

**KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE
KALICI GERİLMELERİN ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK
BELİRLENMESİ**

Bekir ÇEVİK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METAL EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2009
ANKARA**

Bekir ÇEVİK tarafından hazırlanan KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE KALICI GERİLMELERİN ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Yusuf ÖZÇATALBAŞ
Tez Danışmanı, Metal Eğitimi Anabilim Dalı

Bu alışma, jürimiz tarafından oy birliğiyle Metal Eğitim Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Adem KURT
Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Yusuf ÖZÇATALBAŞ
Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Nizamettin KAHRAMAN
Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Karabük Üniversitesi

Tarih :/..../2009

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nail ÜNSAL
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü
Hata! Düzenleme alan kodlarından nesneler oluşturulamaz.

**KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE KALICI
GERİLMELERİN ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ**
(Yüksek Lisans Tezi)

Bekir ÇEVİK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Haziran 2009

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, kaynaklı birleştirmelerde oluşan kalıcı gerilmelerin birleştirmenin mekanik özelliklerine etkisini araştırmaktır. Bu amaçla, Fe 37 kalite yapı çeliği lama malzemeler (50×10 mm ve 70×10 mm) kullanılmıştır. 70×10 alt lamaya yatay çekme presinde eksenel çekme yükü uygulanarak 91 N/mm², 148 N/mm², 194 N/mm² ve 222 N/mm²'lik farklı öngerilmeler oluşturulmuştur. Belirtilen öngerilmelere maruz alt lama üzerine yerleştirilen 50×10 üst lama, bindirme köşe kaynağı ile öngerilmeli lamaya birleştirilmiştir. Kaynaklı birleştirme tamamlandıktan sonra alt lamalardaki öngerilme kaldırılmıştır. Bu sayede köşe kaynaklı birleştirmede farklı kalıcı gerilmeler oluşturulmuştur. Kaynaklı birleştirmede oluşturulan kalıcı gerilmelerin, birleştirmenin mekanik özelliklerine etkilerini belirleyebilmek için çekme/makaslama deneyi uygulanmıştır. Ayrıca kaynak dikişlerinde oluşturulan kalıcı gerilmelerin analizi için fotoelastisite tekniği uygulanmıştır. Vishay PALC 3 Photostress programı kullanılarak dikişlerdeki kalıcı gerilmeler ölçülmüştür.

Kalıcı gerilmelerdeki artış, kaynaklı birleştirmenin akma dayanımını ve % uzama miktarını düşürmüştür. Öngerilmesiz köşe kaynak dikişlerinde en yüksek akma dayanımı ve % uzama miktarı görölürken, 222 N/mm² öngerilmeli kaynaklı birleştirmede minimum mekanik özellikler belirlenmiştir.

Bilim Kodu :710.1.612
Anahtar Kelimeler :Kaynaklı Birleştirme, Kalıcı Gerilme, Mekanik Özellikler, Fotoelastisite
Sayfa Adedi :99
Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Yusuf ÖZÇATALBAş

**EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF EFFECT OF RESIDUAL STRESS
ON MECHANICAL PROPERTIES IN WELDED JOINTS**

(M.Sc Thesis)

Bekir CEVIK

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE & TECHNOLOGY**

June 2009

ABSTRACT

In this study, effect of residual stress on mechanical properties of welded joints was investigated. For this purpose Fe37 grade structural steel plates (50x10 mm and 70x10 mm) were used. In the lower plates (70x10 mm), different prestress (91 N/mm^2 , 148 N/mm^2 , 194 N/mm^2 and 222 N/mm^2) were created by horizontal tensile device. The upper plate (50x10 mm) was placed on the prestressed lower plate and then it was welded by means of corner weld. Having completed welding procedure, prestress in the lower plate was relieved. By this way, in the welded joints, various residual stress were created. Effects of residual stress on mechanical properties of welded joints were determined by tensile/shearing test. Also residual stress in the welded joints were analysed by Photoelasticity technique and measured via Vishay PALC3 programme. Yield stress and strain decreased with increasing residual stress in the welded joints. The highest yield stress and strain were determined for the welded joint which was not subjected to prestress. However, minimum mechanical properties were observed for joint prestressed with 222 N/mm^2 .

Science Code	: 710.1.612
Key Word	: Welded Joint, Residual Stress, Mechanical Properties, Photoelasticity
Page Number	: 99
Adviser	: Assoc. Prof. Dr. Yusuf OZCATALBAS

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince değerli yardımları ve katkılarıyla beni yönlendiren danışman hocam Doç. Dr. Yusuf ÖZÇATALBAŞ'a, deneylerin tüm aşamasında yardımlarını esirgemeyen Uzman Alpay ÖZER'e, çekme testleri sırasında yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Volkan KILIÇLI'ya, yüksek lisans eğitimim boyunca değerli teşvik ve katkılarından dolayı Prof. Dr. Ulvi ŞEKER, Doç. Dr. İhsan KORKUT ve Yrd. Doç. Dr. Behçet GÜLENÇ hocalarıma, tezin yazım aşamasındaki katkılarından dolayı Erhan ÇUHADAR ve Kadir GEVREK arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca bugünlere gelmemde maddi-manevi en büyük emeği olan değerli anneme, babama ve ağabeyime saygı ve şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	viii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiv
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAKLI BİRLEŞTİRME VE KAYNAK YÖNTEMLERİ.....	3
2.1. Gazaltı Kaynağı Yöntemleri (MIG/MAG).....	5
3. KALINTI GERİLMELER.....	7
3.1. Kalıntı Gerilmelerin Oluşum Nedenleri.....	9
3.1.1. Yapısal uyumsuzluk nedeni ile meydana gelen kalıntı gerilmeler.....	9
3.1.2. Isıl gerilmeler neticesinde meydana gelen kalıntı gerilmeler.....	11
3.1.3. Düzenli dağılmayan plastik şekil değişimi ile meydana gelen kalıntı gerilmeler.....	13
3.2. Distorsiyon ve Kalıntı Gerilmelerin Önlenmesi.....	14
3.2.1. Kalıntı gerilmelerin önlenmesi.....	14
3.2.2. Kalıntı gerilme ve distorsiyonları azaltmak için alınabilecek tedbirler.....	15
3.2.3. Kaynaktan sonra alınması gereken tedbirler.....	16

Sayfa

4. KAYNAK KALINTI GERİLMELERİ.....	19
4.1. Ergitmeli Kaynaklarda Kaynak Bölgesi.....	19
4.2. Kaynak İşleminde Kalıntı Gerilmelerin Oluşum Nedenleri.....	20
4.3. Kaynak Kalıntı Gerilmelerini Etkileyen Faktörler.....	22
4.3.1. Esas metal ve kaynak metali.....	22
4.3.2. Parça boyutu.....	23
4.3.3. Parça uzunluğu.....	24
4.3.4. Parça kalınlığı.....	25
4.3.5. Kaynak yöntemleri.....	26
4.3.6. Kaynak işlem planı.....	26
4.3.7. Kaynak hızı.....	28
4.3.8. Elektrod çapı.....	28
5. KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELERDE KALINTI GERİLMELERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ.....	30
5.1. Distorsiyon (Çarpılma).....	30
5.2 Kalıntı Gerilmelerin Distorsiyona Etkileri.....	31
5.3. Kalıntı Gerilmelerin Kaynakta Çekme, Basma ve Yorulma Dayanımına Etkisi.....	33
5.4. Kalıntı Gerilmelerin Kaynaklı Birleştirmelerde Kırılmaya Etkisi.....	34
5.5. Gerilme Giderilmesinin Etkisi.....	34
6. KALINTI GERİLME ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ.....	36
6.1. Tahribatlı Kalıntı Gerilme Ölçme Yöntemleri.....	36
6.1.1. Tabaka kaldırma yöntemi.....	36

Sayfa

6.1.2. Delik delme yöntemi.....	37
6.1.3. Halka çekirdek yöntemi.....	38
6.1.4. Kanal açma yöntemi.....	38
6.1.5. Tüp yarma yöntemi.....	39
6.1.6. İnce kesitlere ayırma yöntemi.....	40
6.2. Tahribatsız Muayene Yöntemleri.....	41
6.2.1. Kırınım yöntemleri.....	41
6.2.2. Ultrasonik yöntemler.....	42
6.2.3. Manyetik yöntemler.....	43
6.2.4. Fotoelastisik (PhotoStress) analiz yöntemi.....	44
7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	48
7.1. Deney Malzemeleri.....	48
7.1.1. Malzeme.....	48
7.1.2. Kaynak teli.....	49
7.1.3. Koruyucu gaz.....	49
7.2. Metot.....	51
7.2.1. Deney cihazları.....	51
7.2.2. Kaynak parametreleri ve kaynak dikişi boyutlandırılması.....	54
7.2.3. Numunelerin kaynağa hazırlanması ve kaynaklı birleştirmenin yapılması.....	57
7.2.4. Numunelerin çekme deneyine hazırlanması.....	60
7.2.5. Fotoelastik kaplama malzemesi harlanması ve numunelere yapıştırılması.....	62
7.3. Fotoelastisite Yöntemi ile Gerilme Analizi.....	68

Sayfa

7.3.1. Pilot (ön) testler ve fotoelastisite analizi için çekme levhası uygulaması.....	68
7.3.2. Kaynaklı birleştirmenin fotoelastisite malzemesi ile kaplanması ve analizi.....	69
7.3.3. Kaynaklı birleştirilmiş çekme levhasında gerilme analizi.....	70
7.3.4. Öngerilmeli birleştirmelerdeki kaynak dikişlerinin gerilme analizi.....	71
8. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	73
8.1. İkiz Numunelerde Öngerilmeye Bağlı Oluşan Sehimler	73
8.2. Çekme/Makaslama Testi Sonuçları	74
8.3. Ön Test Çekme Levhasında Gerilme Analizi Sonuçları.....	80
8.4. Kaynaklı Birleştirilmiş Çekme Lamasında Gerilme Analizi Sonuçları.....	84
8.5. Öngerilmeli Birleştirmelerdeki Gerilme Analiz Sonuçları.....	88
9. SONUÇLAR.....	93
KAYNAKLAR.....	95
ÖZGEÇMİŞ.....	99

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Bazı kaynaklı çelik yapıların gerilim giderme ısı işlem sıcaklığı.....	17
Çizelge 7.1. Deneyde kullanılan lama malzemelerin kimyasal kompozisyonu.....	48
Çizelge 7.2. 50×10 mm boyutlarındaki yarı mamül levha malzemenin mekanik özellikleri.....	49
Çizelge 7.3. Kaynak telinin kimyasal bileşimi	49
Çizelge 7.4. Kaynak telinin mekanik özellikleri.....	49
Çizelge 7.5. HB 220 koruyucu gazın karışım oranları.....	50
Çizelge 7.6. PL 1 fotoelastik resinin bazı fiziksel özellikleri.....	52
Çizelge 7.7. Kaynak parametreleri.....	58
Çizelge 7.8. Kaynaklı birleştirilen alt çekme lamasında oluşturulan öngerilmeler...	58
Çizelge 7.9. Mikrometre ve kompensatörde okunan değerler.....	66
Çizelge 7.10. Çekme levhası için uygulanan yükler ve kuvvet çizgisi sayıları.....	69
Çizelge 7.11. Öngerilmemiş kaynak dikişine uygulanan yükler ve kuvvet çizgisi sayıları.....	71
Çizelge 7.12. Öngerilmeli kaynak dikişinde uygulanan yük ve kuvvet çizgisi sayıları.....	71
Çizelge 8.1. Öngerilmeli ve öngerilmemiş birleştirmenin mekanik özellikleri.....	75
Çizelge 8.2. Çekme levhasının fotoelastik analiz sonuçları.....	80
Çizelge 8.3. Uygulanan çekme yüküne göre teorik olarak hesaplanan ve fotoelastisite ile ölçülen gerilim ve gerilme farkları.....	81
Çizelge 8.4. Teorik ve fotoelastisite analizi ile sonuçların karşılaştırılması.....	83
Çizelge 8.5. Öngerilmemiş kaynaklı lamanın fotoelastisite sonuçları.....	84
Çizelge 8.6. Öngerilmemiş kaynaklı çekme lamasının kaynak dikişlerinde oluşması muhtemel gerilmeler ve fotoelastisite sonuçları.....	85

Çizelge**Sayfa**

Çizelge 8.7. Öngerilmeli kaynaklı birleştirmelerin fotoelastik analiz sonuçları..... 90

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. MIG/MAG kaynak yönteminde ark bölgesinin şematik görünümü.....	5
Şekil 3.1. Taşlama ile talaş kaldırılan bir malzemede oluşan kalıntı gerilmeler.....	8
Şekil 3.2. Kaynaklı bir parçada oluşan boyuna kalıntı gerilmeler.....	8
Şekil 3.3. Farklı uzunluktaki çubukların uç bölgelerinden birleştirilmeleri sonucu oluşan kalıntı gerilmeler.....	9
Şekil 3.4. Üç çubuklu çerçevede, ortadaki çubuğun gerilme-sıcaklık eğrisi.....	10
Şekil 3.5. Kaynak işlemi sırasında sıcaklık ve gerilim değişiminin şematik gösterimi.....	12
Şekil 3.6. Büyük tanklarda kaynak dikişi sırası.....	16
Şekil 3.7. Alevle ısıtma teknikleri.....	18
Şekil 4.1. Alın ve köşe birleştirmede tane yönlenmesi ve segregasyon oluşumu.....	19
Şekil 4.2. Çeliklerde sıcaklığın ITAB’ da mikroyapıya etkisi.....	20
Şekil 4.3. Tek pasolu alın kaynak birleştirmesinde kalıntı gerilme dağılımı.....	21
Şekil 4.4. Şekil 3.5’de verilen artık gerilme ölçümleri için kaynak şartları.....	23
Şekil 4.5. Kaynaklı parçalarda uzunluğun artık gerilme dağılımına etkisi.....	24
Şekil 4.6. Çok pasolu alın kaynağında kalıntı gerilme dağılımı.....	25
Şekil 4.7. Alın kaynağı yapılan çelik levhalarda kalınlığın büzölmeye etkisi.....	26
Şekil 4.8. Adım atlanarak yapılan geri adım kaynağı.....	27
Şekil 4.9. Levhaların kaynakla birleştirilme sırası.....	28
Şekil 10.10. Alın kaynaklarında, elektrod çapının enine çekmeye etkisi.....	29
Şekil 5.1. Muhtelif kaynak distorsiyon türleri.....	30
Şekil 5.2. Kaynaklı bir parça üzerinde çekme gerilmeleri ve distorsiyon türleri.....	31

Şekil	Sayfa
Şekil 6.1. Delik delme yöntemi.....	37
Şekil 6.2. Halka çekirdek yöntemi.....	38
Şekil 6.3. Kanal açma yöntemi.....	39
Şekil 6.4. Tüp yarma yöntemi.....	40
Şekil 6.5. İnce kesitlere ayırma yöntemi.....	40
Şekil 6.6. Geleneksel XRD yöntemi.....	42
Şekil 6.7. Ferromanyetik malzeme içerisindeki domenler ve manyetik dipoller.....	43
Şekil 6.8. Işığın polarizasyonu.....	45
Şekil 6.9. Düzlemsel polariskop.....	46
Şekil 6.10. Sirküler polariskop ve çalışma düzeni.....	47
Şekil 7.1. Deney malzemesi boyutları.....	48
Şekil 7.2. Köşe kaynak dikişi geometrileri.....	55
Şekil 7.3. Öngerilmeli ikiz numune üretimi.....	57
Şekil 7.4. Öngerilmeli çekme numunesi üretim aşamaları.....	60
Şekil 7.5. Kaplama malzemesi hazırlama düzeneği şematik görüntüsü.....	62
Şekil 7.6. Kalibrasyon eğrisi.....	66
Şekil 7.7. Fotoelastisite kaplama malzemesi kalibrasyon çizelgesi.....	67
Şekil 7.1. Kaynak çekme çubuğu.....	70
Şekil 8.1. İkiz numunede kaynaklı birleştirme ile meydana gelen ters sehimin şematik gösterimi.....	73
Şekil 8.2. Birleştirmeye uygulanan farklı öngerilmelerin birleştirmenin akma gerilmesine etkisi.....	76
Şekil 8.3. Kaynak birleştirmeye uygulanan farklı öngerilmeler ile akma noktasına kadar % uzama miktarları arasındaki ilişki.....	79

Şekil	Sayfa
Şekil 8.4. Çekme levhasında gerilme durumu.....	81
Şekil 8.5. Çekme levhasının teorik ve fotoelastisite gerilme analiz sonuçları.....	83
Şekil 8.6. 30 kN yük altındaki gerilmelerin Mohr Dairesi ile bulunması.....	84
Şekil 8.7. Öngerilmesiz kaynaklı lamada kaynak dikişlerinde oluşması muhtemel gerilmeler ve fotoelastisite sonuçları grafiği.....	86
Şekil 8.8. Alt lamadaki öngerilme serbest bırakıldıktan sonra birleştirmede meydana gelen moment etkisi.....	89
Şekil 8.9. Öngerilmeli kaynaklı birleştirmede kalıcı gerilmelerin dağılımı.....	89
Şekil 8.10. Öngerilme yüküne göre kaynak dikişinde meydana gelen kalıcı gerilmeler.....	91

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 5.1. Boyuna kalıntı gerilme sonucu kaynakta çapraz kırılma.....	34
Resim 7.1. Farklı karışım gazlarda oluşan nüfuziyet görüntüleri.....	50
Resim 7.2. Yatay çekme deney cihazı ve kaynak ünitesi.....	51
Resim 7.3. Kaplama malzemesi üretimde kullanılan cihaz ve malzemeler.....	53
Resim 7.4. Fotoelastisite ölçüm cihazı.....	54
Resim 7.5. Farklı öngerilme yükleri altında üretilen ikiz numuneler.....	59
Şekil 7.6. Kalıcı gerilmeli çekme numuneleri.....	61
Resim 7.7. Kalıcı gerilmeli kaynaklı birleştirmelerin çekme deneyi.....	62
Resim 7.8. Fotoelastik kaplama malzemesi yapıştırılmış gerilmesiz kaynak dikişi.....	63
Resim 7.9. Kalibratör ve kalibrasyon levhası.....	64
Resim 7.10. Kalibrasyon levhasında ölçüm noktası.....	64
Resim 7.11. Mikrometre 0,5 mm eğim oluşturduğu durumda kalibrasyon levhasının görünümü.....	65
Resim 7.12. Mikrometre 0,5 mm ve Fringe Sayısı 0,13 olduğunda ölçüm noktası üzerinde görünen siyah band.....	65
Resim 7.13. Çekme levhasının kaplanmış görüntüsü.....	68
Resim 7.14. Kaynaklı birleştirilmenin fotoelastik analiz süreci ve deney düzeneği.....	70
Resim 8.1. Öngerilmelerin serbest bırakılması sonucu ikiz numunelerde oluşan sehimler.....	74
Resim 8.2. Öngerilmesiz numunenin çekme/makaslama testi sonrası kaynak dikişlerinin ve kopma bölgelerinin görüntüsü.....	77

Resim	Sayfa
Resim 8.3. 91 N/mm ² öngerilme uygulanan numunenin çekme/makaslama testi sonrası kaynak dikişlerinin ve kopma bölgelerinin görüntüsü.....	77
Resim 8.4. 148 N/mm ² öngerilme uygulanan numunenin çekme/makaslama testi sonrası kaynak dikişlerinin ve kopma bölgelerinin görüntüsü.....	78
Resim 8.5. 194 N/mm ² öngerilme uygulanan numunenin çekme/makaslama testi sonrası kaynak dikişlerinin ve kopma bölgelerinin görüntüsü.....	78
Resim 8.6. 222 N/mm ² öngerilme uygulanan numunenin çekme/makaslama testi sonrası kaynak dikişlerinin ve kopma bölgelerinin görüntüsü.....	79
Resim 8.7. Çekme yükü uygulandığında çekme levhasında malzemede tüm yüzey boyunca oluşan siyah band.....	80
Resim 8.8. 25 kN'luk yük uygulandığında kaynak dikişinde oluşan gerilme dağılımı.....	86
Resim 8.9. 50 kN'luk yük uygulandığında kaynak dikişinde oluşan gerilme dağılımı.....	87
Resim 8.10. 75 kN'luk yük uygulandığında kaynak dikişinde oluşan gerilme dağılımı.....	87
Resim 8.11. Öngerilmeli kaynak dikişinin fotoelastik kaplama malzemesi ile kaplanmış görüntüsü.....	88
Resim 8.12. 155,4 kN yükle maksimum öngerilme oluşturulduğunda kaynak dikişinde meydana gelen fotoelastik görüntüsü.....	91

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
a	Kaynak dikiş kalınlığı
A	Akım
A_k	Toplam kaynak dikiş alanı
α	Açı
Ar	Argon
C	Karbon
cm	Santimetre
CO₂	Karbondioksit
D	Çap
dak	dakika
E	Elastikiyet modülü
f	Plastik kaplamanın kalibrasyon oranı
Fe	Demir
GPa	Giga Pascal
gr	gram
in	inç
K	Optik gerinim katsayısı
kN	Kilo Newton
L	Kaynak dikiş boyu
lt	Litre
max	Maksimum
min	Minimum
mm	Milimetre

Simgeler**Açıklama**

μm	Mikrometre
Mn	Mangan
MPa	Mega Pascal
N	Newton
P	Yük
Si	Silisyum
sn	Saniye
t	Malzeme kalınlığı
ϵ_1, ϵ_2	Asal gerinimler
δ	Sehim miktarı
σ_a	Akma gerilmesi
σ_{ζ}	Çekme gerilmesi
$\sigma_{\max}$	Maksimum gerilme
σ_x	x eksenı boyunca oluşan gerilme
σ_y	y eksenı boyunca oluşan gerilme
τ_{xy}	Kayma gerilmesi
v	Possion oranı

Kısaltmalar**Açıklama**

A.B.D.	Anabilimdalı
HB	Karışım gaz kodu
ITAB	Isı tesiri altındaki bölge
G.Ü.T.E.F.	Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi
MAG	Metal Aktif Gaz
MIG	Metal İnert Gaz
ÖG	Öngerilme
TIG	Tungsten İnert Gaz

Kısaltmalar**Açıklama****TS**

Türk Standardı

XRD

X-ışınımı kırınımı

1. GİRİŞ

Kaynak işlemi sırasında birleştirilen malzemenin maruz kaldığı bölgesel termal genleşme ve soğuma süresinde meydana gelen kendini çekme kuvvetleri sebebiyle oluşan kalıntı gerilmeler, kaynaklı konstrüksiyonların dayanımını azaltan, distorsiyona, zamanla çatlamalara ve beklenmedik anlarda malzemenin zarar görmesine neden olan en önemli etkidir [1,2].

Kaynak işlemlerinin büyük bir çoğunluğunda, özellikle ergitmeli kaynaklarda, kaynak bölgesi lokal olarak ergime derecesinin üzerindeki bir sıcaklığa kadar ısıtılır. Ergiyen bölgenin soğuması, ergime esnasında parçalara verilen ısı girdisinden daha yavaş gerçekleşir. Kaynak bölgesini ısıtma ve kaynak sonrası soğuma işlemleri arasındaki farklılıklar kaynak işlemi ile birleştirilen parçalarda istenmeyen metalurjik dönüşümlere ve gerilmelere neden olur. Soğuma esnasında kaynak bölgesinde gerçekleşen bu metalurjik dönüşümlerin meydana geldiği bölgeye ısı tesiri altında kalan bölge (ITAB) denir. ITAB'ta soğuma esnasında farklı büyüklükte tane boyutlarına sahip bölgeler oluşur. Bu bölgeler esas metalin tane yapısı ile karşılaştırılacak olursa hata olarak kabul edilebilir ve birleştirilen parçanın mukavemetini belirler.

Kaynak işleminde, birleştirilecek bölgeye tatbik edilen ısı üniform değildir. Bu nedenle hem kaynak bölgesinde ısı dağılımının üniform olmayışı, hem de uygulanan ısı girdisi ve ısının bu bölgeyi terk etme hızı, birleştirme bölgelerinde bir takım olumsuzluklara neden olur. Bu olumsuzluklar distorsiyonlar (çarpılma) ve kalıntı gerilmelerdir.

Kaynak metalinin sıvı hali hacimce katı halinden daha büyüktür. Ancak katılaşma sırasında sıvı kaynak metali hacim olarak küçülmeye çalışmaktadır. Kaynak metalinin katılaşma esnasında bu küçülme isteği soğuk esas metal tarafından engellenmek istenmektedir. Bu engelleme sonucu katılaşan kaynak bölgesinde gerilmeler meydana gelmektedir. Bu gerilmelere kalıntı veya artık gerilmeler denir. Kalıntı gerilmeler bir yapıda tüm yükler kaldırıldığı zaman ortaya çıkan gerilmelerdir

[1,3]. Kalıntı gerilmeler, kaynak bölgesinin mekanik ve işin geometrik özelliklerini etkilemektedir. Bu etkilerden bir tanesi distorsiyonlara neden olmasıdır. Distorsiyon, bir metal malzemenin bölgesel bir şekilde ısınması ve soğuması sonucu oluşan plastik şekil değişikliğine verilen addır. Kaynaklı birleştirmeler neticesinde meydana gelecek olan distorsiyonlar malzemelerin boyut toleranslarını olumsuz etkilemekte ve yüzey düzgünlüğünü bozmaktadır. Kaynaklı birleştirmenin dinamik veya statik yükler altında kaldığında kaynak bünyesindeki kalıntı gerilmeler bu dinamik ve statik gerilmelerle birleşerek kaynak dikişinin bozulmasına neden olması bir diğer etkidir. Ayrıca kalıntı gerilmelerin varlığı gerilmeli korozyona neden olmaktadır. Kaynak bölgesinde korozyon oluşması durumunda, malzeme yüzeyinde oluşan pürüzler çentik etkisi yaparak kalıntı gerilmelerinde etkisiyle çatlamalara ve kırılmalara neden olur. Tasarım aşamasında kalıntı gerilmelere ve distorsiyonlara neden olan etkiler bilindiği takdirde bu olumsuzlukları giderici bir takım önlemler alınabilir. Ayrıca imalat sırasında alınacak tedbirler ve imalattan sonra uygulanacak bir takım işlemlerle olumsuzluklar azaltılabilir. Ancak hiçbir zaman kalıntı gerilmeler ve distorsiyonlar tamamen engellenemez. Çünkü ısı ve sıvıdan katıya dönüşümün olduğu her durumda kalıntı gerilmelere ve distorsiyonlara rastlamak mümkündür. Bu olumsuzluklara neden olan etkiler bilindiğinde imalattan önce önlem alınabilir hatta olumsuzluklar avantaja dönüştürülebilir.

Bu çalışmada, farklı öngerilme yükleri uygulanmış levha malzemeler köşe kaynakları ile birleştirilmiş ve uygulanan öngerilmeler serbest bırakılarak kaynak dikişinde makaslamaya neden olan belirli miktarlarda kalıcı gerilmeler oluşturulmuştur. Kaynaklı birleştirmede kontrollü oluşturulan bu gerilmeler “Kalıcı Gerilme” olarak adlandırılmıştır. Bu sebeple, öngerilmelerin birleştirmede meydana getirdiği gerilmeler tez metninde kalıcı gerilme olarak adlandırılmıştır. Oluşturulan kalıcı gerilmeler fotoelastisite yöntemi ile belirlenmiştir. Numuneler, çekme/makaslama deneyine tabi tutularak uygulanan öngerilme yüklerinin kaynağın mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır.

2. KAYNAKLI BİRLEŞTİRME VE KAYNAK YÖNTEMLERİ

Kaynak, metalleri kalıcı olarak birleştirmenin en ekonomik ve en etkili yoludur. İki veya daha fazla metalin, monolitik bir yapı olarak tek parça gibi davranmasını sağlayacak tek işlemdir. Kaynak ekonomi içinde yaşamsal bir öneme sahiptir ve bir ülkenin gayri safi milli hasılatının % 50' sinden fazlası, bir şekilde kaynak teknolojisi ile ilgidir. Ayrıca, kaynak en önemli imalat ve konstrüksiyon metodudur. Deniz aşırı seyredabilen gemiler, çelik köprülerin büyük bir çoğunluğu, demir yolu rayları ve vagonları, uzay mekiğinin dış yakıt tanklarının tümü, petrol ve doğalgaz nakleden uluslararası boru hatları, denizlerdeki petrol arama platformları, yüksek su depoları ve petrol depolama tankları da tamamen kaynaklı yapılardır [4]. Özellikle metal malzemelerin kaynağında endüstrinin de gelişmesiyle yeni kaynak tekniklerinin ortaya çıkması ve kaynak uygulanabilen malzemelerin artmasıyla, günümüzde birçok kaynak tanımı ortaya atılmıştır. Bunların içerisinde en geçerli olan tanım aşağıdaki gibidir;

Kaynak aynı veya farklı ısısal özelliklerdeki malzemeleri, ilave dolgu metali kullanarak veya kullanmadan, oluşan yüksek sıcaklıkta, ana malzemenin belli bir miktarının da eriyerek iki malzemenin birleştirilme yöntemine denilir. Kaynak yöntemleri ilave dolgu metali kullanılması veya kullanılmamasına, kullanılan koruyucu ortamına, basınç uygulanmasına göre sınıflandırılır [5]. Bu sınıflandırmadaki kaynak yöntemleri, ergitmeli ve katı hal kaynak yöntemleri olarak iki gruba ayrılmaktadır.

Ergitmeli Kaynak Teknikleri

1. Elektrik ark kaynağı (Örtülü elektrod ile)
2. MAG (Metal Aktif Gaz) kaynağı
3. MIG (Metal İnert Gaz) kaynağı
4. TIG (Tungsten İnert Gaz) kaynağı
5. Tozaltı ark kaynağı
6. Oksi-asetilen kaynağı

7. Elektron ışıın kaynağı
8. Lazer kaynağı
9. Elektro- curuf kaynağı

Katı Hal Kaynak Teknikleri

1. Sürtünme kaynağı
2. Sürtünme karıştırma kaynağı
3. Ultrasonik kaynak
4. Patlamalı kaynak
5. Elektrik direnç kaynağı
6. Difüzyon kaynağı
7. Yüksek frekans kaynağı

Yalın olarak kaynak, metal ve alaşımlarının ergime derecelerinin üzerindeki sıcaklıklarda eritilerek birleştirilmesidir. Bu işlem gerçekleştirilirken, bir ısı kaynağına öncelikle ihtiyaç vardır. Çünkü metal, ancak bir ısı kaynağından alınan ısı enerjisiyle, ergime derecesinin üzerindeki sıcaklıklarda eritilebilir. Birçok kaynak uygulamasında değişik yöntemler kullanarak ısı elde etmek mümkündür. Örneğin; oksijen-gaz kaynağında ısı kaynağı yanıcı ve yakıcı iki gazın birleşiminden ve yakılmasından sağlanırken, elektrik ark kaynağında gerekli olan ısı elektrik enerjisinden elde edilir. Daha sonra ısı uygun donanımlar yardımıyla kaynak bölgesine iletilir [6].

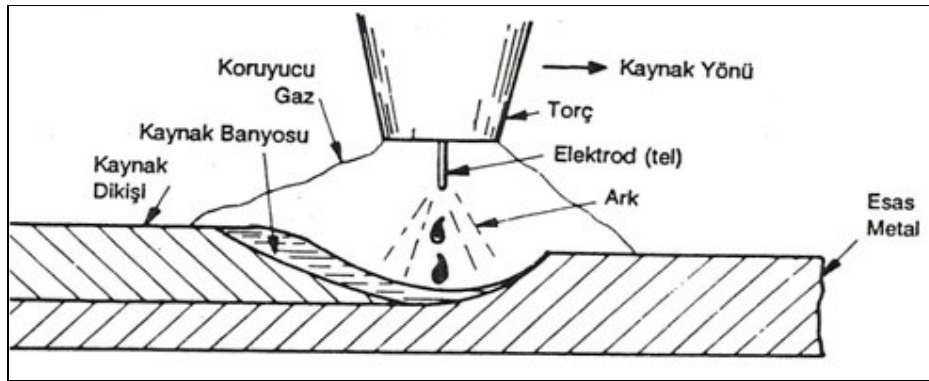
Kaynak tekniği, yüksek uygulama alanlarına sahip talaş kaldırma, dövme, döküm ve benzerleri gibi imal usulleri arasında en yüksek kullanım oranına sahiptir. Kaynak işlemi, diğer herhangi bir endüstriyel prosese göre daha fazla bilimselliğe sahiptir ve daha çok parametre içerir [4].

Bu tez çalışmasında kaynaklı birleştirmeler gazaltı kaynak (MIG/MAG) tekniği ile yapıldığından, gazaltı kaynak tekniği hakkında detaylı bilgi aşağıda verilmiştir.

2.1. Gazaltı Kaynak Yöntemleri (MIG/MAG)

Sanayileşmiş ülkelerde günümüzün en popüler yarı otomatik kaynak yöntemi olan MIG/MAG yöntemi son yıllarda ülkemizde de hızla yayılmaktadır. Üretilen makine ve tel elektrodlar bunun açık göstergesidir. MIG/MAG kaynak yöntemi diğer kaynak yöntemleri ile karşılaştırıldığında çok fazla üstünlükleri bulunmaktadır. Hız, emek gücü, yüksek verim, fazla ergime gücü, kullanılan malzeme ve kalitenin artması bu üstünlüklerdir. [7].

MIG/MAG kaynağında ark, aynı zamanda ilave tel görevi yapan ergiyen bir elektrod ile iş parçası arasında yanar. Kaynak bölgesine elektrod ile beraber koruyucu gaz da gönderilir ve ark bu koruyucu gaz altında oluşur. Koruyucu gaz olarak argon, helyum ve bu gazların karbondioksitle ve oksijenle ($\text{Ar-CO}_2\text{-O}_2$) yaptığı karışım gazlar kullanılır. Çalışma prensibi, sürekli beslenen bir elektrodun iş parçasına gönderilmesi esasına dayanır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. MIG/ MAG kaynak yönteminde ark bölgesinin şematik gösterimi [2, 6].

Gazaltı kaynak yönteminde kaynak banyosu havanın olumsuz etkilerinden kaynak bölgesine gönderilen gaz aracılığı ile korunur. Koruyucu gazlar ayrıca nüfuziyeti de etkiler. Deney numuneleri, sıralanan avantajlardan dolayı gazaltı kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir.

MIG/MAG kaynak yönteminin avantajları;

1. Kaynak işlemi her pozisyonda rahatlıkla gerçekleştirilmektedir.
2. Kaynak telinin kaynak bölgesine sürekli olarak sürülmesi, aralıksız çok uzun kaynak dikişlerinin yapılabilmesine imkan verir.
3. Derin dikiş nüfuziyeti verir. Kaynak metali miktarının az olması esas metal ile benzer mukavemetli iç köşe kaynak bağlantıları elde edilmesine olanak sağlar.
4. Kullanılan tel elektrod çapının diğer yöntemlere göre daha ince olması yığılan kaynak metal miktarının az olmasını, bu da kaynak edilen ana malzemeye ısı girdisinin daha düşük olmasını sağlar.
5. Kaynak işlemi sırasında sıçramaların az olması ve kaynak dikişi yüzeyinde curufun olmayışı, kaynak sonrası temizleme işlemlerini azaltır [8].

MIG/MAG kaynağının kullanımının artması ile bu yöntemde kullanılan koruyucu gazların geliştirilmesi, çeşitli gaz karışımları ile yapılan kaynak bağlantılarının dikiş özelliklerinin incelenmesi yolunda araştırmalar yapılmaktadır. Özellikle, gaz karışımlarının dikiş özelliklerinin iyileştirilmesi ve daha hızlı, ekonomik bağlantılar oluşturulması açısından önemi oldukça büyüktür [7].

3. KALINTI GERİLMELER

Bir konstrüksiyonda sadece elastik şekil değişimine müsaade edilir. Uygulanan bir dış kuvvet, konstrüksiyonu oluşturan elemanlarda bir iç gerilme oluşturur. İç gerilmelerde elastik şekil değişimine neden olur. Dış kuvvet kaldırılınca iç gerilmeler ve elastik şekil değişimleri yok olur. Bir konstrüksiyona uygulanan bütün dış kuvvetler kaldırılrsa bile mevcut elemanlarda kalan gerilmelere ‘kalıntı gerilme’ denir. Bu gerilmelere; artık gerilmeler, gizli gerilmeler, reaksiyon gerilmeleri gibi adlar da verilmektedir [9,10].

Üretim aşamasında distorsiyonlar, genellikle kaynaklı üretim sebeplidir. Bunun yanında distorsiyonlara neden olan diğer sebepler de mevcuttur. Bunlar;

1. Malzemedeki başlangıç distorsiyonları
2. Kalıntı gerilmeler
3. Malzeme hazırlama işlemleri
4. Kesme ve fon verme işlemleri
5. Kaldırma, taşıma
6. Isıl işlemler, v.s.

Kaynak sonrası distorsiyonlar birçok parametreye bağlı olarak gelişmektedir. Bu parametreler genel olarak üç gruba ayrılabilir. Bunlar da aşağıda sıralanmıştır.

1. Malzeme parametreleri
2. Dizayn parametreleri
3. Üretim parametreleri

Malzeme parametreleri, kaynak edilecek malzeme, kaynakta kullanılan dolgu metal malzemesi ve bunların termo-mekanik özelliklerini içermektedir. Termal iletkenlik, termal genleşme katsayısı, elastisite modülü, akma gerilmesi ve bunların sıcaklıkla gösterdikleri değişimler en önemli malzeme parametreleridir. Dizayn parametreleri ise kaynaklı yapının şekil ve geometrisi, kaynak ağzı, paso sayısı, birleştirme tipi,

kaynak sırası vs oluşturmaktadır. Üretim parametreleri ise kaynak yöntemini (MIG, MAG, TIG, Lazer), akım, voltaj ve kaynak hızını içermektedir [11, 12].

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi malzeme bünyesinde oluşan kalıntı gerilmeler haddeleme, dövme, döküm, taşlama gibi işlemler sırasında meydana gelebilir. Hatta malzemenin bükülmesi, biçim verilmesi, kesilmesi, işlenmesi gibi imalat metodları esnasında da kalıntı gerilmeler oluşabilir. Isıl işlemin çeşitli safhalarında da kalıntı gerilmelerin etkisi olabilmektedir. Örneğin temperleme ısıl işlemi gerilmeleri azaltırken, su verme işlemi kalıntı gerilmeleri artırır [13].

Şekil 3.1. Taşlama ile talaş kaldırılan bir malzemede oluşan kalıntı gerilmeler [13].

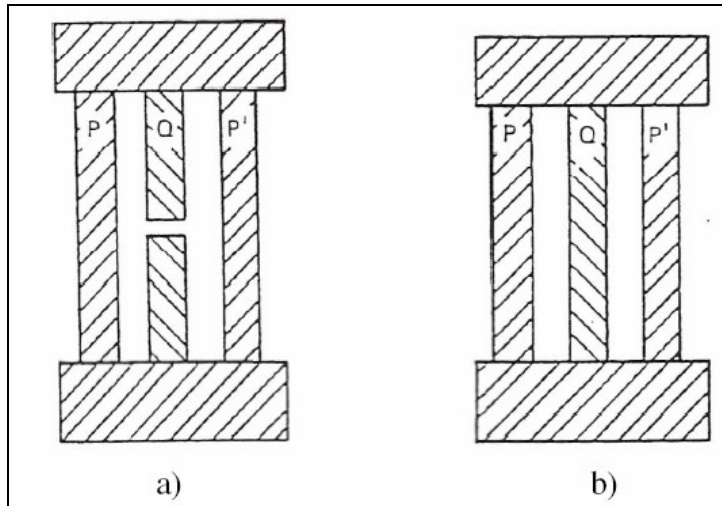
Şekil 3.2. Kaynaklı bir parçada oluşan boyuna kalıntı gerilmeler [13].

Kalıntı gerilmeler çekme veya basma gerilmesi şeklinde olabilmektedir. Kalıntı gerilmeler esas olarak üniform olmayan plastik deformasyona ve/veya üniform olmayan sıcaklık değişimine bağlı olarak meydana gelebilir [14].

3.1. Kalıntı Gerilmelerin Oluşum Nedenleri

3.1.1. Yapısal uyumsuzluk nedeni ile meydana gelen kalıntı gerilmeler

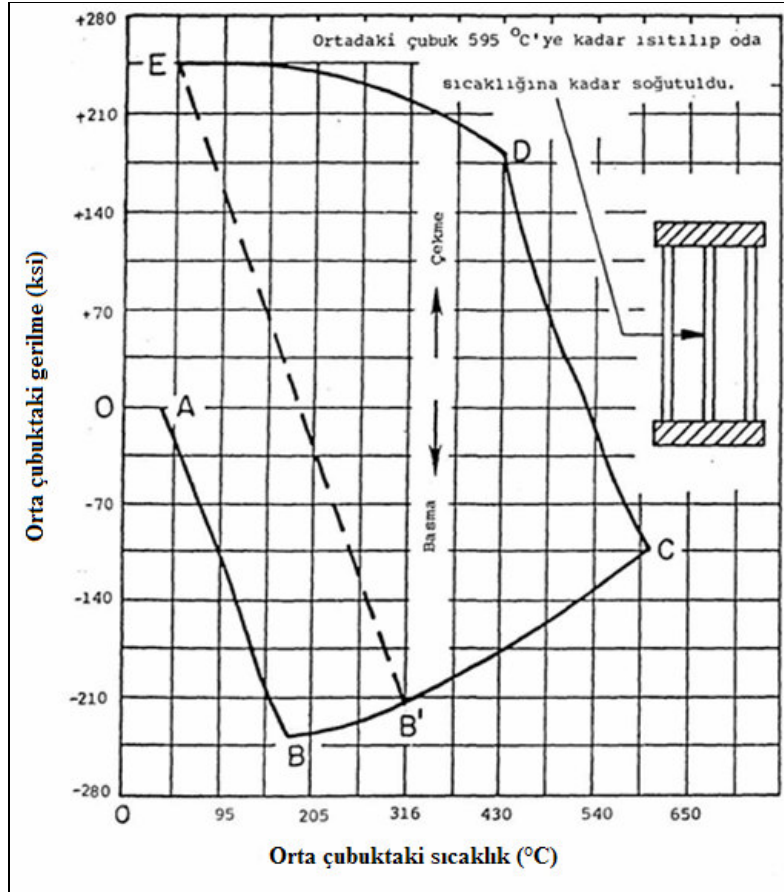
Şekil 3.3' te gösterilen çubuklardan kısa olan Q çubuğunun uç bölgelerinden birbirine birleştirilmesi örneği kalıntı gerilmelerin oluşmasına ait en tipik örnektir. Rijit levhalar arasına bağlanan çubuklardan kısa olan Q çubuğunun uçları çekilerek birleştirilmiştir. Bu işlemden dolayı Q ile gösterilen kısa çubukta çekme gerilmeleri, P ve P' uzun çubuklarda ise basma gerilmeleri meydana gelmiştir [15].



Şekil 3.3. Farklı uzunluktaki çubukların uç bölgelerinden birleştirilmeleri sonucu oluşan kalıntı gerilmeler a) Serbest, b) Tespit edilmiş durum[15].

Şekil 3.4'te ise ısıtma ve soğutma çevrimi sebebiyle oluşan kalıntı gerilmeler açıklanmıştır. Alaşımsız yapı çeliklerinden aynı uzunluk ve kesitlerde üretilen üç adet çubuk, iki rijit parça arasına monte edilmiştir. Dıştaki iki çubuk oda sıcaklığında tutularak ortadaki çubuk 595 °C'ye ısıtılmış ve orta çubuk oda sıcaklığına tekrar soğutulmuştur. Şekil 3.4'te, sistemde meydana gelen kalıntı gerilmeleri göstermek

için, orta çubuktaki gerilmelerin sıcaklık ile değişimi grafik olarak gösterilmiştir. Dışta bulunan iki çubuk, ortadaki çubuğun deformasyonuna karşı koyar. Bu sebepten dolayı, dıştaki çubuktaki gerilmelerin her biri, orta çubuktaki gerilme değerinin yarısına eşittir [15].



Şekil 3.4. Üç çubuklu çerçevede, ortadaki çubuğun gerilme-sıcaklık eğrisi [15].

Üç çubuklu sistemde çubuklar rijit bloklar arasında bulunduklarından çubuk boy uzunlukları sürekli eşit kalır. Bu nedenle çubuklarda gerilme oluşmuştur. Isınma kademesinde çubuklardan sadece bir tanesi ısındığından, ısınan çubuk genişlemek isterken diğerleri büzülmeye çalışacaktır. Soğuma kademesinde ise ters yönde şekil değişimleri gerçekleşecektir, orta çubuk büzülecektir. Bu şekil değişimleri

ubuklarda ekme veya basma gerilmelerinin oluşumu sonucunda meydana gelecektir [9].

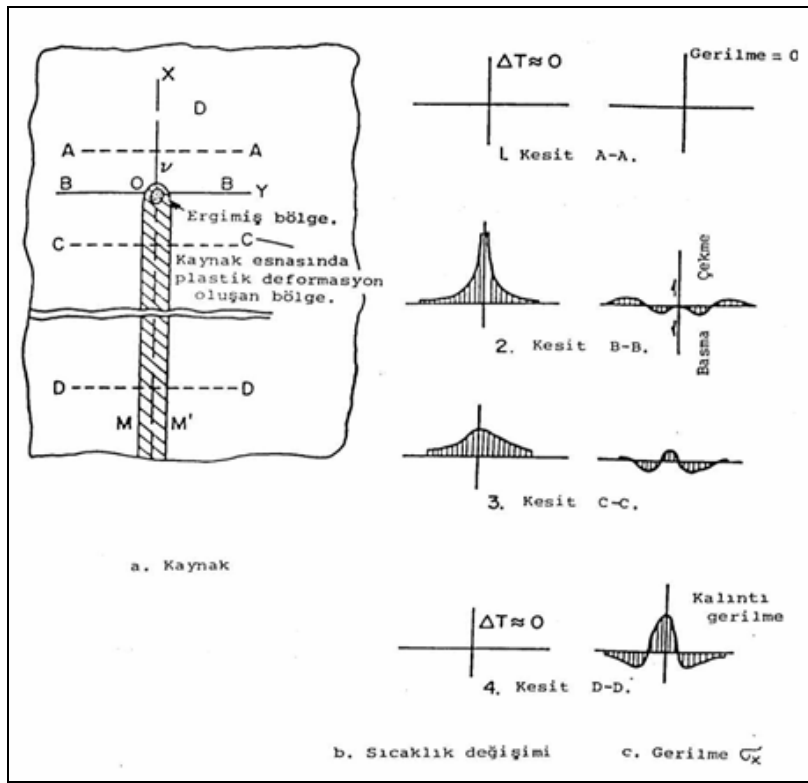
Ortakdaki ubuk ısıtıldığı zaman uzaması, yanlardaki çubuklar tarafından engellendiği için basma gerilmeleri oluşur. Sıcaklık arttırıldığında parçadaki gerilmeler de değişim gösterir (AB eğrisi). B noktasında sıcaklık yaklaşık 170°C'ye geldiği zaman basma gerilmeleri parçanın akma noktasına kadar ulaşır. Bu noktaya kadar gerilme lineer olarak artmaktadır. Sıcaklık artmaya devam ettikçe, orta çubuktaki gerilme, akma gerilmesine bağlı olarak azalır. Bu durum, BC eğrisinde görülmektedir [9,15].

595°C sıcaklığın aşağısına soğuma sırasında ise, orta çubuk büzülme eğilimi gösterecektir. Sıcaklık düştükçe çubuktaki basma gerilmeleri de hızla düşer ve yn değiştirerek çekme gerilmelerini oluştururlar. Diyagramdaki D noktasına gelindiğinde, çekme gerilmeleri, orta çubuğun akma noktasına kadar ulaşmıştır. Bu noktadan sonra sıcaklık azaldıkça gerilme, her sıcaklık derecesindeki akma gerilmesi olarak sınırlanır. Böylece orta çubukta, oda sıcaklığındaki mevcut çekme gerilmesine eşit kalıntı çekme gerilmesi oluşur. Her bir yan çubukta oluşan kalıntı gerilmeler ise basma gerilmeleridir ve orta çubuktaki çekme gerilmesinin yarısına eşittir. B'E izgisi, orta çubuğun oda sıcaklığındaki akma gerilmesine eşit değerdeki kalıntı gerilmelerin, 315°C'nin üzerinde herhangi bir sıcaklığın tatbikiyle oluşabileceğini göstermektedir [9].

3.1.2. Isıl gerilmeler neticesinde meydana gelen kalıntı gerilmeler

şekil 3.5'te x ekseni boyunca yapılan kaynak işlemi sırasında oluşan sıcaklık ve gerilmelerdeki değişiklikler şematik olarak gösterilmektedir. şekil 3.5.a'da v sabit hızıyla hareket eden kaynak arkı O ile gösterilen orjindedir. M-M' ile gösterilen taralı alan, kaynaktaki ısı çevrimi sırasında oluşan plastik deformasyonun olduğu bölgedir. Taralı alan dışındaki bölgeler, kaynak sırasında ısı çevrimi esnasında elastik kalır.

x-x doğrultusu üzerinde A, B, C ve D noktalarındaki sıcaklık dağılımı Şekil 3.5.b’de açıklanmıştır. Kaynak arkı önündeki A-A kesitinde, kaynak sebebi ile oluşan sıcaklık değişimi (ΔT) sıfır kabul edilir. Kaynak arkı gerisindeki B-B kesitinde ise sıcaklık dağılım eğrisi diktir. Kaynak arkının gerisindeki C-C kesitinde sıcaklık dağılımındaki diklik daha azdır. Çok geride kalan D-D kesitinde ise sıcaklık değişimi neredeyse sıfırdır ve üniform bir dağılıma sahiptir.



Şekil 3.5. Kaynak işlemi sırasında sıcaklık ve gerilim değişiminin şematik gösterimi [15, 16].

A-A, B-B, C-C ve D-D kesitlerinde x yönündeki gerilmelerin dağılımı (σ_x) Şekil 3.5.c de verilmiştir. A-A kesitindeki kaynak sebebiyle meydana gelen ısı gerilmeleri sıfırdır. Kaynak arkının B-B kesitindeki gerilmeleri, ergimiş metalin yükleri karşılamaması nedeniyle sıfıra yakındır. Kaynak arkından biraz uzakta bulunan bölgelerdeki gerilmeler düşük sıcaklıktaki esas metalin, bu bölgenin genişlemesini sınırlandırmasından dolayı basma gerilmeleri şeklindedir. Kaynak arkı yakınındaki

metal sıcaklığı çok yüksektir ve sonuç olarak akma dayanımları düşüktür. Basma gerilmeleri, metalin mevcut sıcaklığındaki akma seviyesindedir. Kaynak bölgesinden uzaklaştıkça basma gerilmelerinin değeri maksimum değere ulaşır. Denge şartlarından dolayı belirli bir uzaklıkta, çekme gerilmelerinin, ısının etkisi altındaki bölgelerdeki basma gerilmeleri ile dengelenmesi gerekir. B-B kesitindeki bu denge durumu ve gerilme dağılımı Şekil 3.5.c’de gösterilmiştir [15, 16].

C-C kesitinde, kaynak metali ve ısının etkisi altındaki bölge artık soğumuştur ve büzülmeye başlar. Bu nedenle kaynak metali çekme gerilmelerine sebep olur. Şekil 3.5.c’de gerilme dağılımından da görüleceği gibi oluşan çekme gerilmeleri, esas metaldeki basma gerilmeleri tarafından dengelenmiştir.

Artık gerilmeler son durumu D-D kesitinde gösterilmiştir. Bu kesit boyunca, kaynak dikişinden uzakta esas metalde basma gerilmeleri, kaynak dikişi ve ısının etkisi altındaki bölgelerde ise çok yüksek çekme gerilmeleri meydana gelmiştir [15].

3.1.3. Düzenli dağılmayan plastik şekil değişimi ile meydana gelen kalıntı gerilmeler

Bilindiği gibi bir malzeme üniform olarak ısıtıldığı zaman, düzenli bir genleşme gösterir ve cismin içinde termal gerilmeler oluşmaz. Diğer taraftan, malzeme düzensiz olarak ısıtılırsa, sıcaklık farkı olan bölgelerde termal gerilmeler oluşur. Bu termal gerilmelerin sonunda bölgesel şekil değişimleri meydana gelir. Meydana gelen şekil değişimleri hem elastik hem de plastik şekil değişimleri olabilir. Bir cisme uygulanan dış kuvvetler de bölgesel plastik şekil değişimine yol açabilir. Bu bölgesel plastik şekil değişimleri cismin içerisinde kalıntı gerilmelerin oluşumuna neden olur [9].

3.2. Distorsiyon ve Kalıntı Gerilmelerin Önlenmesi

Distorsiyonun kontrolü bazı tekniklerle sağlanabilir. En çok kullanılan yöntem, kaynak öncesi ve kaynak esnasında birleşme şeklini kontrol edebilmektir. Parçaların kaynaktan önceki ilk pozisyonunu uygun seçerek veya parçaları sabitleyerek kaynak esnasında hareket etmeleri ve çarpılmaları engellenebilir. Bir başka yararlı yöntem de, yığılan kaynak metal miktarını birleşme ekseninin her iki tarafına dengeli bir biçimde dağıtabilmektir. Kaynak yönteminin seçimi ve kaynak sırası da kalıntı gerilme ve distorsiyonun oluşumuna etki eder. Parçalarda oluşan distorsiyon mekanik yöntemlerle düzeltilebildiği gibi, ısı ve alev etkisiyle de düzeltme yapılabilir [13].

3.2.1. Kalıntı gerilmelerin önlenmesi

Kalıntı gerilmeler, termal ve mekanik olmak üzere iki yöntemle giderilebilir. Termal yöntemde, var olan gerilmelerin malzemenin plastik şekil değiştirmesini sağlayabileceği ısı derecesine kadar, malzeme tavllanır. Burada malzemenin elastik şekil değiştirme noktasının üzerinde bir tavlamaya gerek vardır. İşlemde, kaynak yerinin mekanik özellikleri daima değişir. Fakat bu değişme, kaynak kesitinde her zaman devamlı ve daha düzenli bir gerilme dağılımı arz etmez. Bu işlemde, birçok kaynak yapılmış çelik malzemelerde, termal gerilim yardımıyla kalıntı gerilmeler azaltıldığı için, gevrek kırılma direncide iyileştirilebilir. Ayrıca ITAB'ın sertliği de azaltılmış olur. Mekanik gerilim uygulama işlemi ise kalıntı gerilmeleri azaltır, fakat, malzemenin mikro yapısını ve ITAB'ın sertliğini değiştiremez. Çekiçleme ve ters yönde gerilim uygulama gibi teknikler bu sonucu elde etmek için uygulanabilir [13]. Bir kaynaklı birleştirmede meydana gelen yada gelme ihtimali olan kalıntı gerilme ve distorsiyonları önlemek için, kaynaktan önce, kaynak sırasında ve kaynaktan sonra olmak üzere tedbirler alınabilir [17].

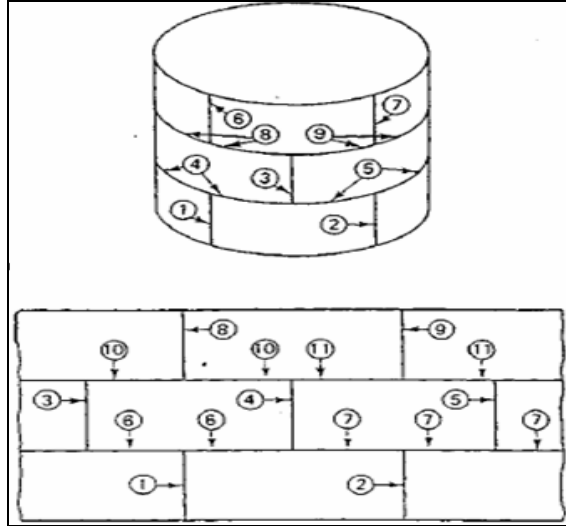
3.2.2. Kalıntı gerilme ve distorsiyonları azaltmak için alınabilecek tedbirler

Konstrüktif tedbirler

1. Kaynak dikişleri lüzumundan fazla çekilmemeli, aksi taktirde distorsiyon ve gerilmelerde artma olur.
2. İnce sacların iç köşe dikişleri aralıklı şekilde yapılmalı.
3. Kaynak dikişleri simetrik olmalı ve mümkün olduğu kadar malzemenin ağırlık merkezine yerleştirilmeli.
4. Mümkün olduğunca kuvvet hatlarının ani yön değiştirmelerinden kaçınılmalı.
5. İnce parçaların kaynağı esnasında burkulmaya uğramamaları için takviye edilmeli.
6. Kaynak dikişleri birbirine çok yakın olmamalı.
7. Mümkün olduğu kadar şekil değiştirme kabiliyeti yüksek malzemeler seçilmeli.
8. Konstrüksiyon, kaynak sırasında parçaların kendini çekebilmeleri göz önüne alınarak tertiplenmeli [17].

Teknolojik tedbirler

1. Uygun kaynak sırası takip edilmeli (Şekil 3.6)
2. Kök pasoda kalın elektrot kullanılmalı.
3. Takviyeler en son kaynatılmalı.
4. Çift taraflı kaynak tercih edilmeli.
5. Çekme kuvvetinin ters yönünde açı verilmeli.
6. Dikişler sıçrayarak ve geri adım usulüyle kaynatılmalı.
7. Açısal distorsiyonu önlemek için, mümkün olduğu kadar kalın tabakalar halinde kaynak pasosu çekilmeli.
8. Küçük pasolarla yapılan kaynaklarda, pasolar önce levha kenarından başlatılmalı [17].



Şekil 3.6. Büyük tanklarda kaynak dikişi sırası [17].

İşletmeyle ilgili tedbirler

1. Kaynak ağzıları dikkatli şekilde hazırlanmalı.
2. Parçalar kaynaktan önce puntalanmalı.
3. Kaynak sırası ve kaynak planı uygulanmalı.
4. Sertleşme kabiliyeti yüksek olan malzemelerde ön tavlama yapılmalıdır [17].

3.2.3. Kaynaktan sonra alınması gereken tedbirler

Parçalara kaynaktan sonra mümkünse gerilim giderme tavlaması uygulanmalıdır. Muhtelif çelikler için gerilim giderme tav sıcaklıkları Çizelge 3.1’de verilmiştir. Bu yöntemle kalıntı gerilme miktarı ısıtma sıcaklığına, ısıda tutma süresine, çeliğin kimyasal bileşimine, akma mukavemetine ve soğuma hızına bağlıdır [18].

Çizelge 3.1. Bazı kaynaklı çelik yapıların gerilim giderme ısı işlem sıcaklığı [18].

Malzeme	Sıcaklık, °C
Alaşımız	595 – 680
C - % ½ Mo	595 – 720
% ½ Cr - % ½ Mo	595 – 720
% 1 Cr - % ½ Mo	620 – 730
% 2 Cr - % ½ Mo	705 – 760
% 5 Cr - % ½ Mo	705 – 770
% 9 Cr - % 1 Mo	705 – 760
%16Cr	760 – 815
% 2 - 5 Ni	595 – 650
% 9 Ni	650 – 585
İslah çeliği	540 – 550

Çekiçleme

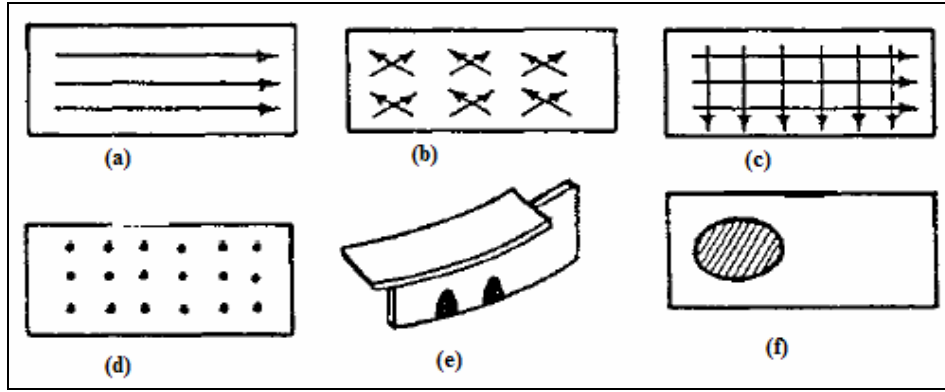
Çekiçleme ile eğilme momenti oluşmadan, çatlak meydana gelmeden düşük oranda sertleştirme ve plastik şekil verme sertleşmesi yapılır. Bu işlemde basit çekiçler kullanılabildiği gibi pnömatik çekiçlerde kullanılır. Bu işlem ilk ve son paso hariç ara pasolar çekildikten sonra yapılır [17]. Örnek olarak dökme demirin kaynağı verilebilir.

Titreşimle gerilim giderme

Kalıntı gerilme, düşük ve yüksek frekanslı titreşimlerle azaltılabilir. Bu işlem sırasında mikro yapıda herhangi bir değişim söz konusu olmaz. Kullanılan cihaz değiştirilebilir hıza sahip titreştirici (vibratör) ihtiva eder. Vibratör hızı ayarlanarak iş parçasında resonant frekansında titreşim elde edilir. İşlem süresi 10–30 dakika arasında değişir. Bu yöntem ısı işlemlerden daha ucuz ve işlem zamanı çok kısadır [17].

Alevle ısıtarak düzeltme

Çarpılmış kaynaklı yapıların düzeltilmesinde en yaygın kullanılan yöntemlerden biride alevle ısıtma yöntemidir. Bu yöntemin prensibi ısıtılan malzeme içerisinde büyük bir dik sıcaklık gradyanı birbirine çok yakın iki nokta arasında sıcaklık farkı oluşturmaktır. İşlem için büyük bir şaloma kullanılır. İş parçasını ısıtırken çok yüksek sıcaklıklar elde edilmese de ani ısıtma sonucunda malzeme tekrar soğurken büzülecektir.



Şekil 3.7. Alevle ısıtma teknikleri a) Çizgisel ısıtma, b) Çam iğnesi ısıtma, c) Çapraz ısıtma, d) Normal ısıtma, e) Üçgen ısıtma, f) Geniş alan ısıtma [17].

Şekil 3.7’de alevle ısıtma teknikleri verilmektedir. Burada çizgisel ısıtma, eğilen levhaların düzeltilmesi için kullanılır. Çapraz ısıtma, büyük distorsiyonları yok etmek amacıyla kullanılır. Çam iğnesi ısıtma tekniği, çizgisel ve noktasal ısıtma tekniği arası bir tekniktir. İki doğrultuda meydana gelen büzülme ve çarpılmaların düzeltilmesi için kullanılır. Üçgen ısıtma tekniği özellikle eğilme çarpılmalarının düzeltilmesinde kullanılır. Geniş alan ısıtma tekniği ise çok daha büyük oranda çarpılma gösteren bölgelerin düzeltilmesinde kullanılır [17].

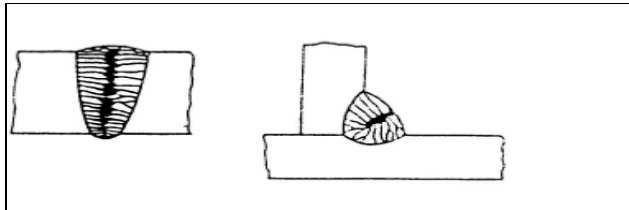
4. KAYNAK KALINTI GERİLMELERİ

Kalıntı gerilmeler ark kaynağı esnasında kaynak bağlantısının çevresinde gelişmektedir. Kaynak bölgesi çoğu kaynak yöntemleri tarafından bölgesel bir şekilde ısıtılır, dolayısıyla kaynak bağlantısı boyunca üniform olmayan sıcaklık dağılımı ve metalurjik değişiklikler meydana gelir. Bundan dolayı kaynak kalıntı gerilmesinden bazen sınırlama gerilmesi olarak da bahsedilir [19]. Bu gerilmeler bazı olumsuz koşullara ve distorsiyona sebebiyet verir. Hidrojen kırılabilirliği sınırlama altında yapılan kaynakta çentik etkisi yapar. Bu sebeple kalıntı gerilmeler, kaynaklı konstrüksiyonun güvenilirlik ve kalitesinde önemli rol oynar [19–21].

4.1. Ergitmeli Kaynaklarda Kaynak Bölgesi

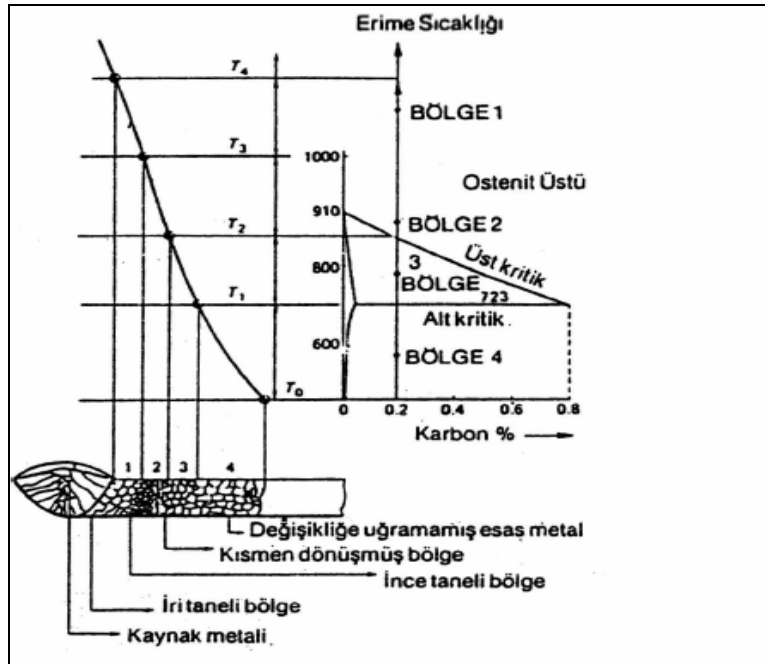
Bir kaynaklı birleştirmede banyo, ısı etkisi altındaki ana malzeme ve kaynak ilave malzemesinin birlikte ergiyip karışmasından oluşmaktadır [12]. Dolayısıyla kaynak bölgesi farklı yapı ve özellik gösteren iki bölgeye ayrılır. Bunlar, kaynak metali ve ısı tesiri altında kalan bölgedir (ITAB).

Ergiyen bölge, kaynak banyosunda meydana gelen türbülansın dolayısı ile katılaşmadan önce birbirine karışmış esas metal ve ilave kaynak metalinden oluşur. Uygulanan kaynak yöntemi ve kaynak ağız formuna bağlı olarak karışımdaki esas metalin oranı değişiklikler gösterebilir. Kaynak metalinin katılaşması, kendini çevreleyen esas metale ısı iletimi ile olur ve bölgenin yapısı iri ve uzun tanelidir [15]. Bunun nedeni soğumanın en geç kaynağın orta bölgesinde olması ve katılaştıran tanelerin en son soğuma bölgesine doğru yönelip katılaşmasıdır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Alın ve köşe birleştirmede tane yönelmesi ve segregasyon oluşumu [22].

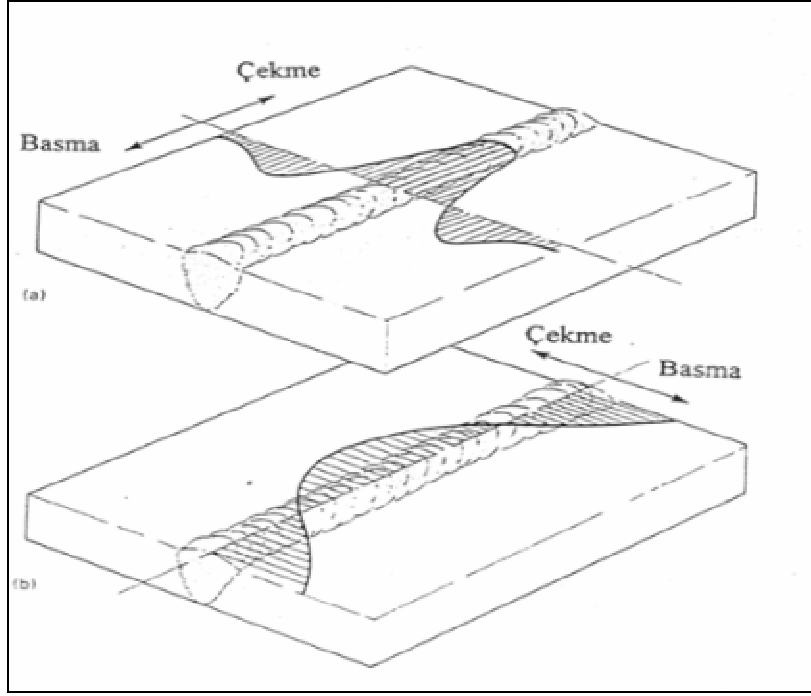
Isının tesiri altında kalan bölge kaynak metali ile esas metalin birleştiği sınırdan başlayarak, kaynak işlemi anında sıcaklığın içyapıya, dolayısıyla metalin özelliklerini etkilediği bölgedir (Şekil 4.2). Çeliklerin kaynağında, bu bölgede sıcaklık yaklaşık olarak 700–1400 °C arasında değişmektedir. Burada erişilen maksimum sıcaklığa bağlı olarak çeşitli içyapı ve özellik gösteren bölgeler oluşur [22]. Çeliklerin kaynağında ITAB, içyapıdaki tane büyüklüğü bakımından iri taneli, ince taneli, kısmen dönüşüme uğramış ve içyapı değişikliğine uğramamış bölgeleri içerir.



Şekil 4.2. Çeliklerde sıcaklığın ITAB’ da mikroyapıya etkisi [22].

4.2. Kaynak İşleminde Kalıntı Gerilmelerin Oluşum Nedenleri

Günümüzde en yaygın kullanılan üretim yöntemlerinden biri de şüphesiz kaynaktır. Bu yöntemin en büyük dezavantajı iç gerilmelerdir. Malzemelerin bölgesel olarak süratle ısınması ve soğuması bir takım çarpımalara ve iç gerilmelerin (Şekil 4.3) oluşmasına neden olmaktadır [10].



Şekil 4.3. Tek pasolu alın kaynak birleştirmesinde kalıntı gerilme dağılımı
a) Boylamasına gerilme dağılımı b) Enlemesine gerilme dağılımı [9].

Bir kaynaklı parçada tüm dış yükler kaldırıldıktan sonra kalan gerilmelere kalıntı (artık) gerilmeler adı verilir. Literatürde kalıntı gerilmeleri tanımlamak için farklı teknik terimler kullanılmıştır. Bunlar iç gerilmeler, başlangıç gerilmeleri, reaksiyon gerilmeleri, hapsolmuş gerilmeler ve doğal gerilmeler olarak adlandırılmaktadır. Üniform olmayan sıcaklık değişimine maruz kalan bir yapıdan meydana gelen gerilmelere ısı gerilmeleri denmektedir [15].

Kaynaklı yapılarda bölgesel ısınma nedeniyle sıcaklık dağılımı düzenli değildir ve kaynak dikişi civarında yapısal değişiklikler oluşur. Kaynak bölgesindeki ergimiş metal katılaştıkça kendini çekmeye çalışır, fakat kaynak bölgesinin dışındaki soğuk metal rijitliğini korur. Bunun sonucunda kaynak bölgesi ve ITAB'da gerilmeler oluşmaya başlar. Ergimiş metalin rijitliği çok düşük ve bunun sonucu oluşan gerilmelerde çok düşüktür. Kaynak yapılan yapı soğumaya başladığında gerilmeler artar ve metalin akma gerilmesinin üzerine çıkar [11]. Ergimiş bölge katılaşıp

soğurken, kaynak metali ve ısının tesiri altında kalan bölgeyi çevreleyen alanda kendini çekme nedeniyle iç gerilmeler oluşur [10].

Kaynak gerilmeleri kalıcı (artık) veya geçici olabilir. Geçici gerilmeler, ısınma veya soğuma esnasında belli bir zaman diliminde vardır. Kalıntı gerilmeler ise işlem tamamlanıp yapı oda sıcaklığına soğuduğunda dahi vardır. Kaynak gerilmeleri üç gruba ayrılabilir. Bunlar;

1. Isıl gerilmeler
2. Metalin plastik şekil değiştirmesinden oluşan gerilmeler
3. Faz dönüşümleri nedeniyle oluşan artık gerilmeler

Isıl gerilmeler, sıcaklığın oda sıcaklığına döndüğünde ortadan kaybolur. Faz dönüşüm gerilmeleri bazı alaşımlı çeliklerin kaynağı esnasında oluşur. Yüksek sıcaklıktaki yumuşak metal faz dönüşümünden dolayı hacim değişikliğine uğrar fakat gerilme önemli miktarda değişmez. Plastik şekil değiştirme nedeniyle oluşan deformasyonlar kaynak dikişinin civarındadır [11].

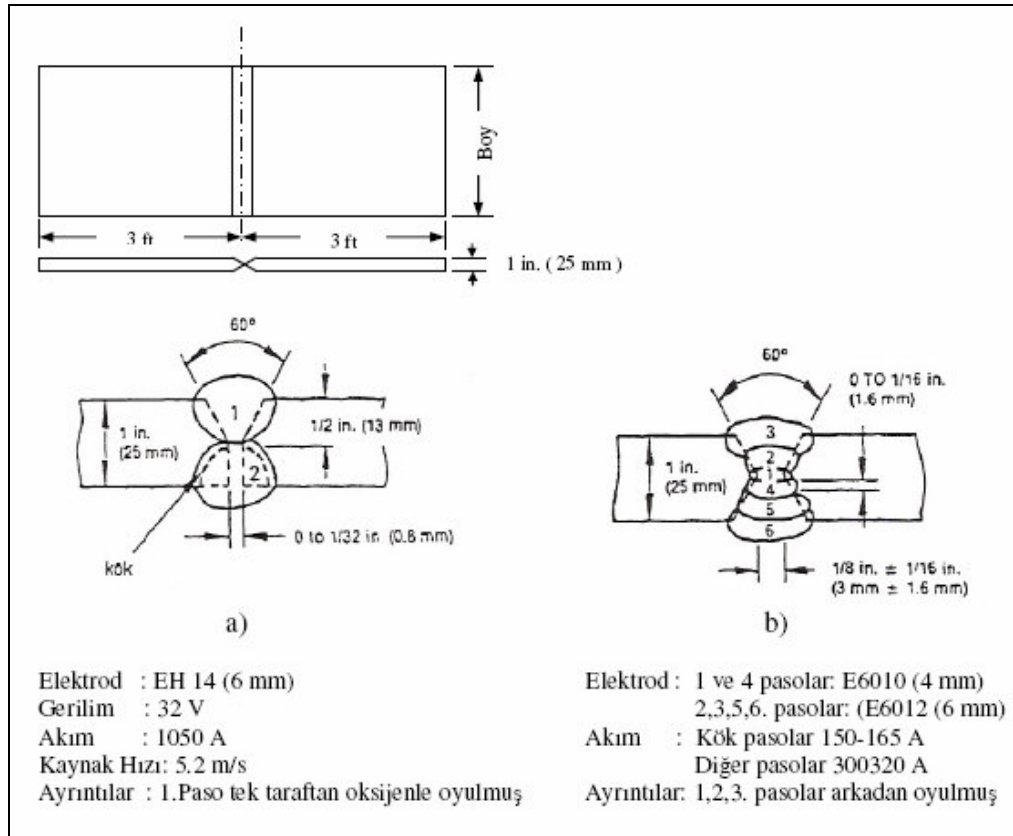
4.3. Kaynak Kalıntı Gerilmelerini Etkileyen Faktörler

4.3.1. Esas metal ve kaynak metali

Karbonlu çeliklerin kaynaklarında kaynak metali ve esas metalin akma gerilimi kadar yüksek olan kalıntı gerilmeler oluşmaktadır. Ayrıca, alüminyum parçaların kaynağında, kaynak bölgesi yakınındaki kalıntı gerilmeler metalin akma gerilmesi kadar yüksek olabilmektedir. Bununla birlikte yüksek dayanımlı çeliklerin kaynağında oluşan kalıntı gerilmeler çoğunlukla akma gerilmesinin oldukça altındadır [13].

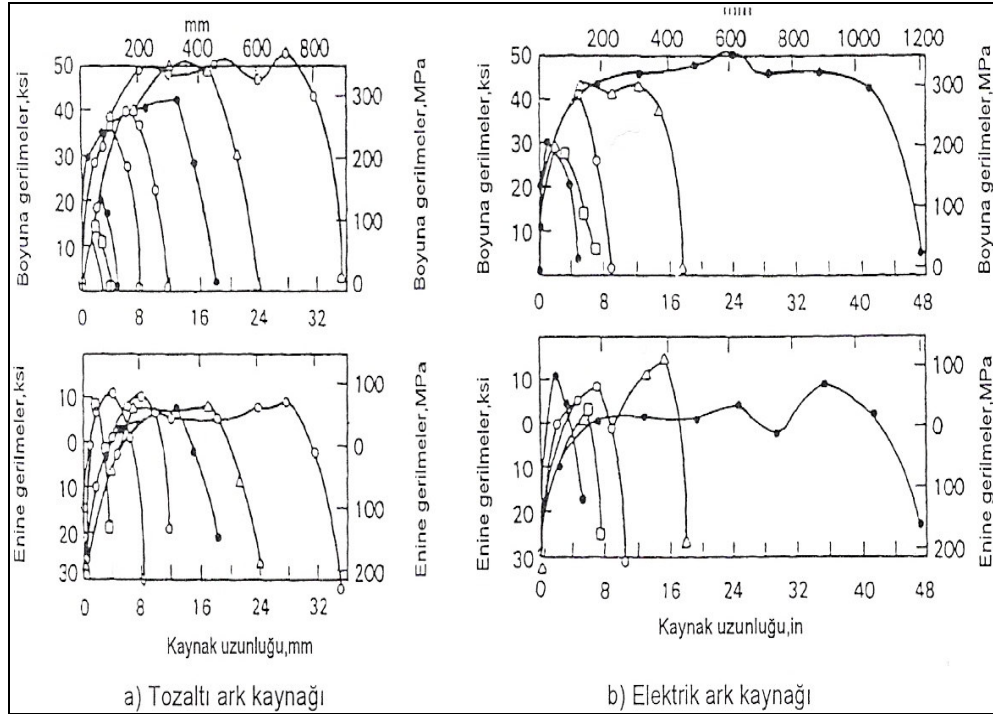
4.3.2. Parça boyutu

Degarmo ve Meriam'in yaptığı bir çalışmada, düşük karbonlu çelik mamul malzemeden, serbestçe uzayıp kısalabilen alın kaynaklı bağlantılardaki kalıntı gerilmelere kaynak dikişi uzunluğunun etkisini inceleyebilmek için, tozaltı ark kaynağı ve elektrik ark kaynağı işlemleri ile iki seri kaynak dikişi hazırlanmıştır [23].



Şekil 4.4. Şekil 4.5’de verilen artık gerilme ölçümleri için kaynak şartları [13].

Bu çalışmadaki kaynak şartları Şekil 4.4’de özetlenmiştir. Her bir seride tek değişken, Şekil 4.5’de gösterildiği gibi, kaynak dikişinin uzunluğudur. Şekil 4.5, her iki yöntemle oluşturulan kaynak dikişlerinde boyuna ve enine kalıntı gerilmelerin dağılımlarını göstermektedir.



Şekil 4.5. Kaynaklı parçalarda uzunluğun kalıntı gerilme dağılımına etkisi [13].

Şekil 4.5’de görüldüğü üzere boyuna kalıntı gerilmeler, kaynak dikişinin her iki ucunda sıfırdır ve yüksek çekme gerilmeleri kaynak dikişinin merkez bölgelerinde bulunmaktadır. Merkez bölgedeki gerilmenin tepe değeri, kaynak dikişi uzunluğunun artışıyla artar [23].

Artık gerilme dağılımları, tozaltı kaynağı ve elektrik ark kaynağı ile yapılan kaynak dikişlerinde birbirine benzemektedir. Ancak elektrik ark kaynağı işlemiyle yapılan kaynak dikişlerinde gerilme dağılımları, tozaltı kaynağı ile yapılan kaynak dikişlerindekiyle kıyasla pek düzgün değildir [17, 23].

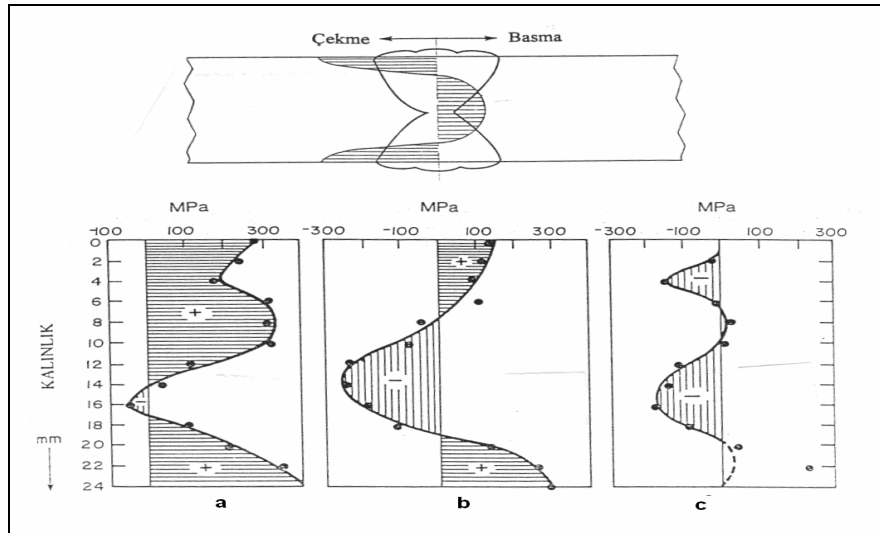
4.3.3. Parça uzunluğu

Bir önceki başlık altında tartışılan parça uzunluğunun etkisiyle karşılaştırıldığında, parça yeterince uzunsa parçanın genişliğinin, kalıntı gerilmeler üzerinde etkisi çok küçüktür. Parça yeterince uzun değilse parça genişliğinin artık gerilmelere etkisi dikkate alınmalıdır. Gerçekte parçanın genişliği, kaynak dikişinin ve ITAB’ın

genişliğinden birkaç kez büyükse, parça genişliğinin etkisi ihmal edilebilir değerdedir [17, 23, 24].

4.3.4. Parça kalınlığı

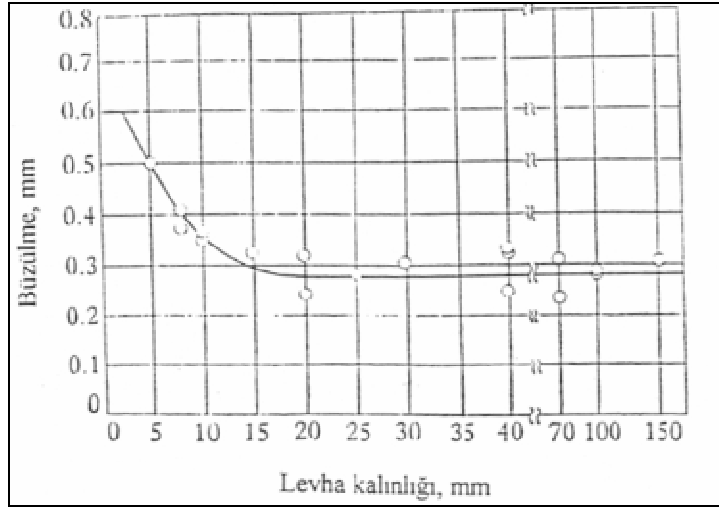
Alın kaynağı yapılan parça kalınlığı arttıkça kalınlık doğrultusundaki gerilmeler önem kazanır, 25 mm'den daha kalın parçalarda daha belirgin hale gelir. Şekil 4.6'da her iki taraftan kaynatılan alın kaynak birleştirmede kalınlık doğrultusunda muhtemel gerilme dağılımı görülmektedir. İlk pasolarda oluşan çekme gerilmeleri daha sonraki dikişlerden etkilenmektedir. Kalıntı gerilme dağılımı kalınlık boyunca değişmektedir. Şekil 4.6'de 500x500x25 mm alaşımsız çelik levhaların alın kaynağında üç eksen (boylamasına, enine ve yüzeye dik) doğrultusundaki gerilme dağılımı görülmektedir [17].



Şekil 4.6. Çok pasolu alın kaynağında kalıntı gerilme dağılımı

a) Boylamasına gerilme b) Enine gerilme c) Yüzeye dik gerilme [17].

Parça kalınlığının büzölmeye etkisi Şekil 4.7'de verilmiştir. Şekilden parça kalınlığı yaklaşık 15 mm'ye kadar azalan bir değerde büzölmeye uğrarken, 15 mm kalınlıktan sonra büzölmenin sabit bir değerde seyrettiği görülmektedir.



Şekil 4.7. Alın kaynağı yapılan çelik levhalarda kalınlığın büzölmeye etkisi [24].

4.3.5. Kaynak yöntemleri

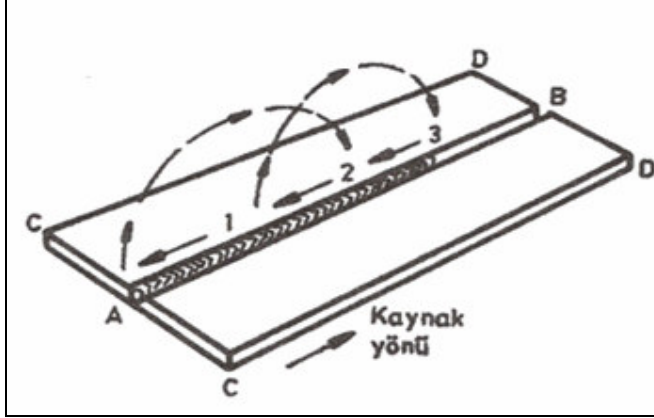
Genel bir kanaate göre, örtölü elektrodla ark, tozaltı ark, gaz-metal ark (MIG, MAG), tungsten ark (TIG) gibi kaynak yöntemleriyle yapılan kaynaklarda oluşan kalıntı gerilmeler benzer olmaktadır. Bu benzerliği Şekil 4.5 a ve b' de örtölü elektrodla ark ve tozaltı ark yöntemiyle yapılan kaynaklarda oluşan kalıntı gerilmeler göstermektedir [13].

4.3.6. Kaynak işlem planı

Uzun bir alın kaynağını yaparken, kalıntı gerilmeleri ve distorsiyonu azaltmak için geri adım, kademeli sıra, blok sırası gibi bazı işlem sıraları izlenir. Uygun olan kaynak işlemini seçmek, özellikle yama kaynakları gibi sınırlandırılmış kaynaklı bağlantıların yapılışı esnasında önemli bir uygulama problemi olmaktadır.

Kaynak işlem planının kalıntı gerilmeler üzerindeki etkileri oldukça geniş bir araştırma konusu olmuştur. Sınırlandırılmış alın kaynaklarında ve dairesel yama kaynaklarında, kaynak işlem planının, kalıntı gerilmeler ve çarpılmalar üzerindeki etkileri araştırılmış ve şu sınıflandırma yapılmıştır.

Çok tabakalı kaynak işlemi planlarında, önce tüm kaynak uzunluğu boyunca birinci tabaka kaynak tamamlanır. Burada düz, geri adım, atlamalı gibi birçok işlem seçilebilir (Şekil 4.8). Sonra ikinci tabaka kaynak ve diğerleri yapılır.

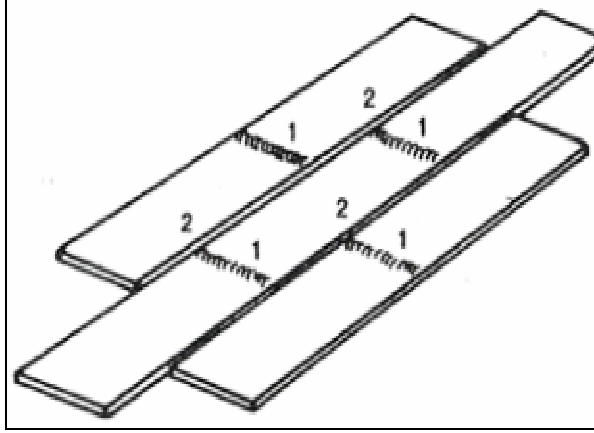


Şekil 4.8. Adım atlanarak yapılan geri adım kaynağı [24].

Blok sıra kaynak işlem planında ise, birleştirme boyunun bir kısmı veya bir bloğu tamamen kaynatılır. Sonra diğer kısım veya blok kaynatılarak işleme devam edilir (Şekil 4.9).

Kaynak boyunca oluşan kalıntı gerilmeleri ele aldığımızda, kaynak işlem sırasının etkisinin az olduğu, tüm test edilen parçalarda yüksek değerlerde boyuna çekme gerilmelerinin bulunduğu söylenebilir.

Kaynak işlem sırasındaki farklılıklar, enine çekmelerde, sınırlandırılmış kaynaklı birleştirmelerdeki toplam gerilim enerjisinin miktarında ve dairesel yama kaynaklarında iç parçadaki reaksiyon gerilmelerinin miktarında dikkat çekici farklılıklara sebep olur. Blok sıra kaynak işleminde ise genelde, çok tabakalı kaynak işleminden daha az çarpılma, gerilim enerjisi ve reaksiyon gerilmesi oluşur [24].



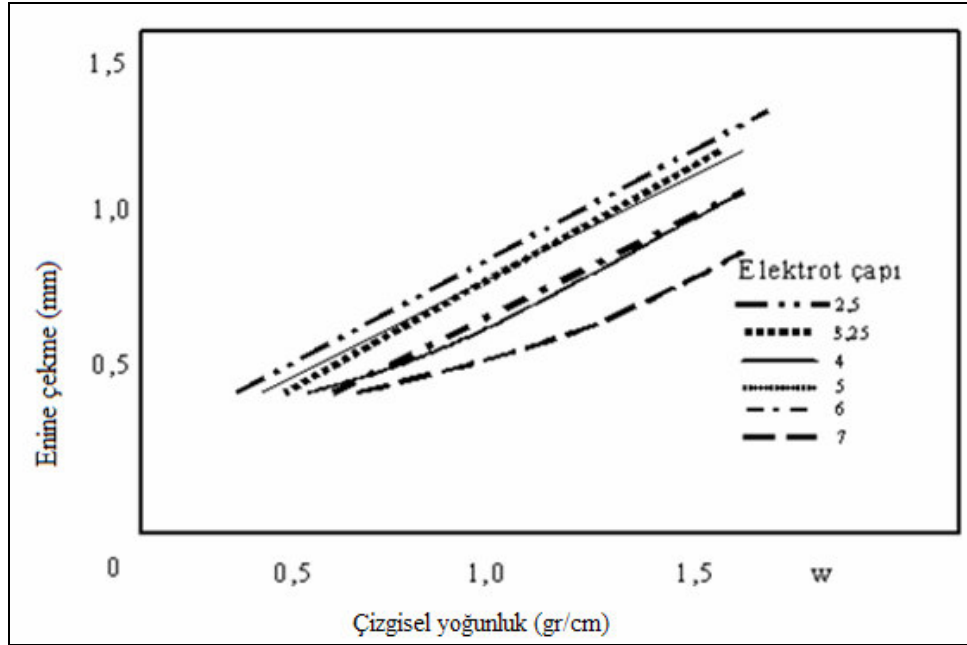
Şekil 4.9. Levhaların kaynakla birleştirilme sırası [24].

4.3.7. Kaynak hızı

Kaynak işleminin hızı, kaynak bölgesinde kalıntı gerilme oluşumuna etki eden bir faktördür. Kaynak işlemi yavaş uygulandığında kaynak bölgesine yığılan kaynak metal miktarı artmakta ve bununla birlikte ısı girdisi de artmaktadır. Kaynak hızını arttırarak ilave metal miktarı azaltılabilir dolayısıyla ısı girdisi de azaltılabilir.

4.3.8. Elektrod çapı

Kaynakta kalıntı gerilmelerin oluşmasına elektrod çapı da etki etmektedir. Elektrodun kalınlığı artırıldığında yığılan kaynak metal miktarı artacağından kaynak işleminin hızını arttırmak gerekir. Bu şekilde ısı girdisi azalacağından kalıntı gerilme miktarı da azaltılabilir. İnce çaplı elektrodlarda ise yığılan ilave metal miktarı az olduğundan kaynak hızı azaltılarak işlem gerçekleştirilecektir. Dolayısıyla kaynak bölgesinde daha fazla ısı girdisi meydana gelecektir. Kaynak bölgesinde ısı girdisinin artmasıyla da kalıntı gerilmeler ve distorsiyonlar artmaktadır. Şekil 4.10'de elektrod çapının enine çekmeye etkisi gösterilmektedir.

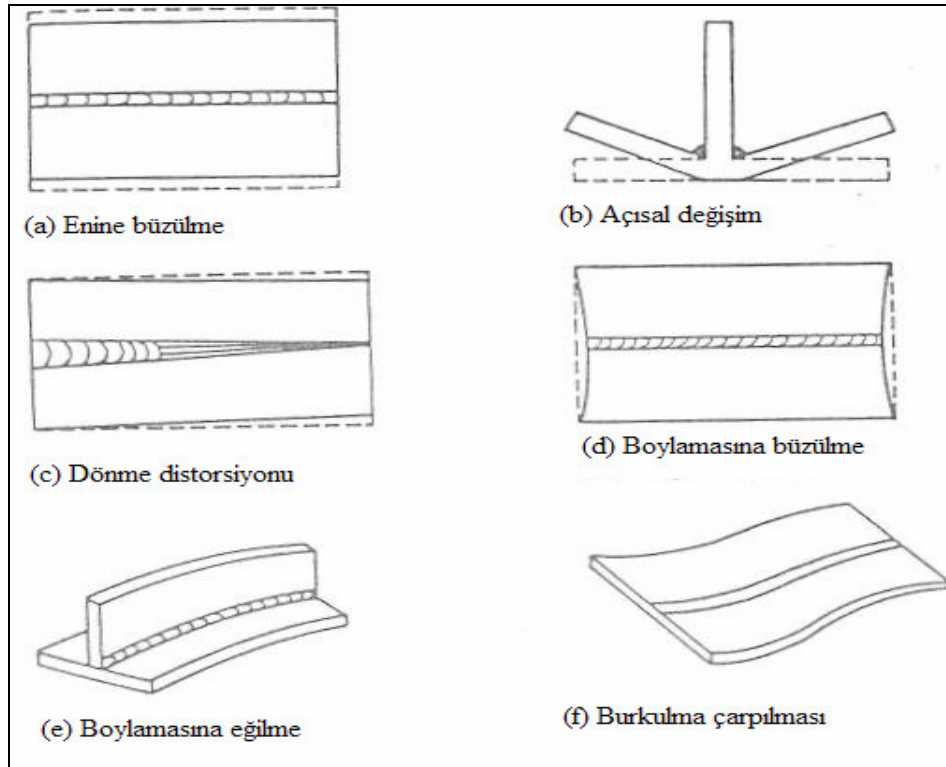


Şekil 4.10. Alın kaynaklarında, elektrod çapının enine çekmeye etkisi (w = birim uzunluğun ağırlığı, gr/cm) [24].

5. KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELERDE KALINTI GERİLMELERİN ÇARPILMAYA VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

5.1. Distorsiyon (Çarpılma)

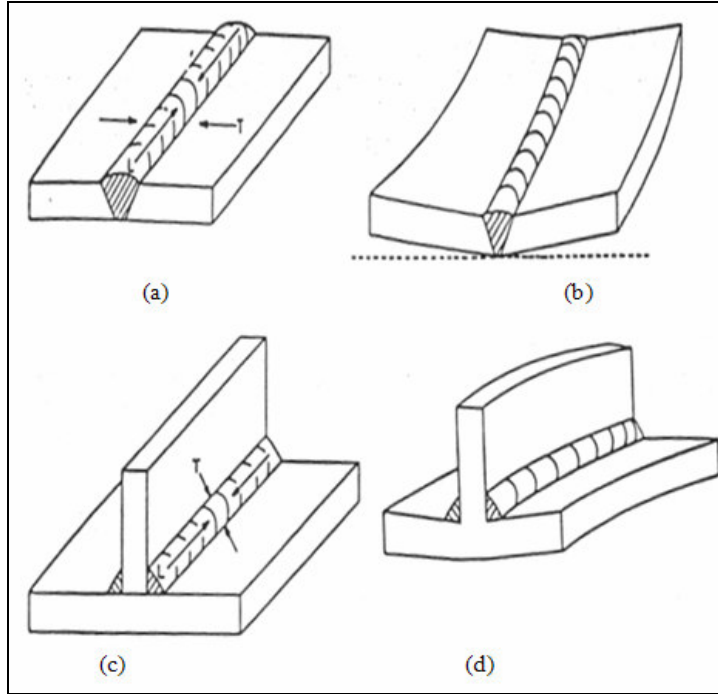
Kaynaklı birleştirme sırasında malzemelerde, ısınmalar ve soğumalar sonucunda, istenmeyen plastik şekil değişiklikleri meydana gelebilir. Şekil değişiminden meydana gelen gerilmeler, diğer gerilmeler ile birleşerek iç kuvvetleri oluşturur. Bu iç kuvvetler kaynaklı yapıda boyutsal değişime, burulmaya ve dönmeye sebep olur. Kaynaklı yapıdaki bu kalıcı şekil değişimine distorsiyon denir [17]. Kaynaklı birleştirmenin sonucunda Şekil 5.1’de görüldüğü gibi farklı distorsiyonlar oluşabilmektedir.



Şekil 5.1. Muhtelif kaynak distorsiyon türleri [17].

5.2. Kalıntı Gerilmelerin Distorsiyona Etkileri

Tüm kaynak yöntemlerinde karşılaşılan en önemli sorun distorsiyonlardır. Aynı malzeme ve aynı konstrüksiyon halinde bile özgül ısı girdisi ve kaynak bölgesinin genişliğine bağlı olarak distorsiyon miktarları değişir. Esasen distorsiyonların; yapının rijitlik derecesi, kütlesi, malzemenin akma sınırı, elastiklik modülü, ısıl genleşme katsayısı, ısı iletim katsayısı, ergime sıcaklığı, özgül ısı girdisi, kaynak bölgesinin boyutları, konstrüksiyon ile kaynak bölgesi arasındaki sıcaklık farkı gibi büyük bir çoğunluğu sıcaklığın fonksiyonu olarak değişen çok çeşitli faktörlerin etkisinde olması, önceden hassas bir biçimde hesaplanmalarını olanaksız kılar. Bu bakımdan literatürde var olan çeşitli bağlantılar ile uygulamalar sonucu elde edilmiş deneyimlerden yararlanmak daha gerçekçi sonuçlar vermektedir [24, 25].



Şekil 5.2. Kaynaklı bir parça üzerinde çekme gerilmeleri ve distorsiyon türleri a) Alın kaynağında boyuna ve enine çekme gerilmeleri b) Alın kaynağında distorsiyon c) İç köşe kaynağında boyuna ve enine çekme gerilmeleri d) İç köşe kaynağında distorsiyon [24].

Çelik malzeme ısıtıldığında genişir, soğutulduğunda ise kendini çeker. Şekil 5.2.a ve c’de alın ve iç köşe kaynaklarında meydana gelen boyuna ve enine çekme gerilmeleri gösterilmektedir. Eğer kendini çekme gerilmeleri elastik sınırların üstünde veya malzemeyi sınırlayan etkenler varsa şekil 5.2. b ve d’de görüldüğü gibi distorsiyon oluşur [22, 24].

Kaynaklı yapı elemanının kaynak işlemine, kaynak bölgesinde (ITAB) üniform olmayan ısınma ve soğumanın neden olduğu bir miktar distorsiyon (çekme ve çarpılma) ve kalıntı gerilmesi eşlik eder. Kaynaklı yapılarda kullanılan kaynak yönteminin, kaynak ağız şeklinin, yapının rijitlik derecesinin, özgül ısı girdisinin, ısı genleşme katsayısının, ısı iletim katsayısının ve erime sıcaklığının çekme ve çarpılma üzerinde etkisi vardır. Bazı kaynaklarda meydana gelen çekme ve çarpılmalar, göz ardı edilebilecek kadar küçük iken, diğerlerinde meydana gelen bu kusurlar kaynak işlemi öncesinde, kaynak işlemi sırasında ve kaynak işlemi sonrasında bir takım önlemlerin alınmasını gerektirecek kadar büyük olabilir [26, 27].

Bir kaynaklı konstrüksiyonda distorsiyon, kaynak bölgesinde ısınma ve soğuma sırasında kaynak metali ile buna komşu ana metalin üniform olmayan genleşme ve çekmesinin bir sonucu olarak ortaya çıkar. Ortaya çıkan bu distorsiyonun hassas olarak önceden tahmini zordur. Hesapların, kısmen bile olsa, üzerine dayandığı fiziksel ve mekanik nitelikler, ısı uygulandığında değişmektedir. Örneğin, kaynak alanının sıcaklığı arttıkça çelik levhanın akma sınırı, elastikiyet modülü ve ısı genleşme katsayısı ile özgül ısı artar. Bu değişmeler, bu kez, ısı akışını ve üniform dağılımını olumsuz yönde etkiler. Böylece de ısıtma sırasında olup bitenlerin hassas hesabını zorlaştırır [22, 24].

Bir kaynaklı birleşmede genleşme ve çekme kuvvetleri kaynak metali ile ana metal üzerine etki yaparlar. Kaynak metali, ana metalle birlikte ergiyip katılaştığından, azami genleşmiş durumda olur. Bir katı olarak mümkün olan en büyük hacmi işgal eder. Soğumada düşük sıcaklıkta normal olarak işgal edeceği hacme çekmeye (büzülmeye) çalışır ama komşu ana metal tarafından engellendiği için bunu yapamaz.

Bu arada kaynak içinde gerilmeler oluşur, bunlar sonunda ana metalin akma mukavemetine varırlar. Bu noktada kaynak dikişi gerilerek ya akar ya da incelir. Böylece de düşük sıcaklığın gerektirdiği hacme uyarlar. Bu yöntem ile sadece kaynak metalinin akma mukavemetini aşan gerilmeler giderilmiş olur. Bu arada kaynak sıcaklığı oda sıcaklığına düşer. İçinde yaklaşık olarak metalin akma mukavemetine eşit değerde hapis kalmış çekme gerilmeleri bulunur. Dış unsurları (iş parçasını tutan, işkence, kelepçe, mengene vb.) kaldırılacak olursa, içeride hapis kalmış gerilmeler kısmen giderilirken kaynaklı konstrüksiyonda distorsiyonlar oluşur [28].

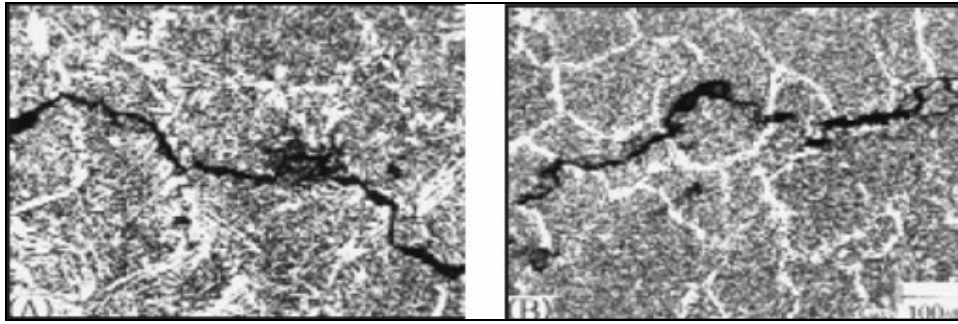
5.3. Kalıntı Gerilmelerin Kaynakta Çekme, Basma ve Yorulma Dayanımına Etkisi

Kaynak dikişinin ergiyip katılaşması esnasında ısıdan etkilenen bölgede, farklı ısınıp soğuma neticesinde iç gerilmeler meydana gelir. İç gerilme miktarı malzemenin akma dayanımı ile sınırlıdır. Akma dayanımının üzerindeki gerilmeler ya parçayı plastik deformasyona uğratar veya parçanın çarpılmasına neden olur.

İç gerilmeler genellikle, çekme iç gerilmeleri ve basma iç gerilmeleri olarak ikiye ayrılır. Her ikisinin de yorulma dayanımına etkisi farklı olmaktadır. Basma iç gerilmeleri genellikle çekme zorlamalarının mevcut olması durumunda olumlu yönde etki ederler. Buna karşın çekme iç gerilmelerinin yorulma dayanımına etkisi farklı olmaktadır. Özellikle yorulmaya zorlanan keskin çentikli yapı elemanlarında, gerilmelerin giderilmesi için gerekli olan plastik şekil değiştirme meydana gelmediğinden veya yetersiz kaldığından, çekme iç gerilmeleri büyük önem arz ederler. Sahip olduğu şekil itibari ile kuvvetli çentik etkisi gösteren yapı elemanlarında kaynak dikişi nedeniyle meydana gelen çekme iç gerilmelerinin varlığı, iç gerilmelerin giderilmesi sonucu, çok eksenli gerilme sistemlerinde yorulma dayanımının oldukça düşmesine neden olur [29].

5.4. Kalıntı Gerilmelerin Kaynaklı Birleştirmelerde Kırılmaya Etkisi

Kalıntı gerilme ve distorsiyon, kaynaklı parçalar düşük seviyede kuvvete maruz kaldığı zaman malzemenin gevrek kırılmasını ve kırılma hareketlerini, eğilmesini etkiler. Eğilme, parça düşük basma gerilmelerine maruz kaldığı zaman bile görülebilir. Yükleme esnasında kalıntı gerilmeler, düşük mukavemetli olan ve bölgesel gerilmelerin toplanmış olduğu kaynak bölgesine yönelirler. Özellikle kalıntı gerilmelerin yoğun olduğu bölgede pürüzlülük veya korozyon meydana gelmişse bu olumsuzluklar çentik etkisi yaparak çatlama ve kırılmayı tetikler [19]. Resim 5.1'te kalıntı gerilme sonucu oluşan çapraz kırılma fotoğrafı görülmektedir.



Resim 5.1. Boyuna kalıntı gerilme sonucu kaynakta çapraz kırılma [19].

Sonuç olarak, kalıntı gerilmeler gevrek kırılmayı başlatarak yayılmasına, malzemenin yorulmasına ve korozyona uğramasına neden olur [13].

5.5. Gerilme Giderilmesinin Etkisi

Kaynaklı birleştirmelerde yüksek iç (kalıntı) gerilmelerin varlığı istenmemektedir. Bundan dolayı gerilmelerin giderilmesine ihtiyaç vardır. Burada iç gerilmeler yükleme işlemi kısmi veya tamamen basınç gerilmesi olması durumunda ve yüksek çevrimli yorulma dayanımı bölgesinde önemlidir. Bunun sebebi, uygulanan gerilmenin basınç kısmının, gerilmesi giderilmiş parçalarda büyük oranda zararsız olmasıdır. Bundan dolayı kaynaklanmış parçaların gerilmelerinin giderilmesinde, kısmi veya tamamen basma gerilmesi akışlarının önemli yarar sağladığı açıkça

görülebılır. Buradaki şart, uygulanan yüklemenin kısmi veya tamamen basma gerilmesi akışını oluşturmastır.

Alüminyumda yorulma çatlağı büyümesi ortalama gerilmeye oldukça hassastır. Sonuçta düşük iç gerilmeli kaynaklı birleştirmelerde, gerilme çevrim sayısı verilerinde uygulanmış çekme veya basma gerilmeleri için bir ortalama gerilme etkisini gösterebilir. Bununla birlikte gerilme kısmi veya basma olduğunda bu etki daha kuvvetli olacaktır [29].

6. KALINTI GERİLME ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

Kalıntı gerilmeler çeşitli tahribatlı ve tahribatsız ölçme yöntemleri ile tespit edilerek ölçülebilir. Tahribatlı ölçme yöntemleri, parçaya delik açılması ve parçadan talaş kaldırılması veya tabaka kaldırılması gibi işlemlerden sonra, parçadaki kalıntı gerilme durumunun belirlenmesi esasına dayanır. Tahribatsız yöntemlerde ise malzemenin fiziksel ve kristalografik parametreleri ile kalıntı gerilmeler arasındaki ilişkiler kullanılır [30].

6.1. Tahribatlı Kalıntı Gerilme Ölçme Yöntemleri

Diğer bir adı mekanik kalıntı ölçme yöntemleri olan bu yöntemler, gerilme gevşemesine müsaade etmek amacıyla kasıtlı olarak malzeme kaldırılarak, gerilme sırasında veya sonrasında parçada meydana gelen şekil değiştirmenin ölçülmesi esasına dayanmaktadır. İlk olarak, test edilen parçadan malzeme kaldırılarak yeni bir gerilme durumu oluşturulur, sonrada yer değiştirmeler ölçülerek gerilmedeki yer değişimi belirlenir. Daha sonra elastisite teorisi kullanılarak kalıntı gerilmeler hesaplanır [30].

6.1.1. Tabaka kaldırma yöntemi

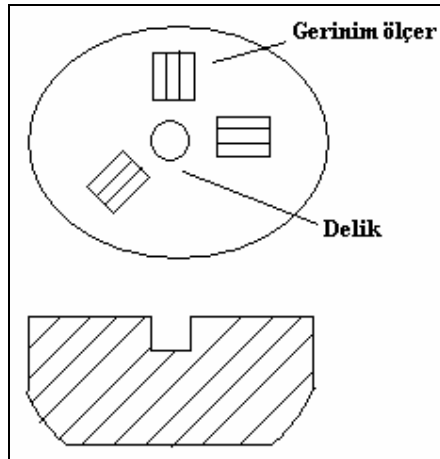
Tabaka kaldırma yöntemi ile kalıntı gerilmelerin ölçülmesinin temel esası, kimyasal veya elektrokimyasal işleme yöntemleri kullanılarak, malzeme yüzeyinden kalıntı gerilmeler içeren ince tabakaları kademeli olarak kaldırılması ile iç gerilmelerin veya momentlerin dengelenmesine dayanmaktadır. İç gerilmelerin yeniden dengelenmesinden dolayı oluşan gerilme veya şekil değiştirmeler, kaldırılan tabakadaki gerilmelerle ilişkilendirilir ve elastisite teorisi yardımıyla kalıntı gerilmeleri hesaplamak amacıyla bu gerinimler ölçülür [30].

Kalıntı gerilmeleri içeren düz bir levhanın bir yüzeyinden ardı ardına tabakalar kaldırıldığı zaman gerilmeler dengesiz hale gelir ve levha eğilir. Levhanın eğriliği kaldırılan tabakadaki orijinal gerilme dağılımına ve levhanın elastik özelliklerine

bağlıdır. Tabaka kaldırıldıktan sonra bir dizi eğrilik ölçümleri yapılarak levhadaki gerilme dağılımı ortaya çıkarılabilir. Numunenin eğriliği ölçme aletinin aralığına ve çözünürlüğüne bağlı olarak, gerinim ölçer (strain-gage), lazer tarama veya optik mikroskop gibi çeşitli yöntemler kullanılarak ölçülebilir [30].

6.1.2. Delik delme yöntemi

Bu yöntemde numuneye özel olarak tasarlanmış bir strain-gage yapıştırılır. Sonra geometrik merkezde, genel olarak 0,4–2 mm derinliğinde, sıg bir delik delinir. Delik içerisindeki gerilmeli tabakanın kaldırılması, malzeme çevresindeki gerilmeleri yeniden düzenlemekte ve rozetteki gerinim ölçer gerilme gevşemelerini ölçmektedir. Şekil 6.1’de delik delme yönteminin şematik görünümü verilmektedir.

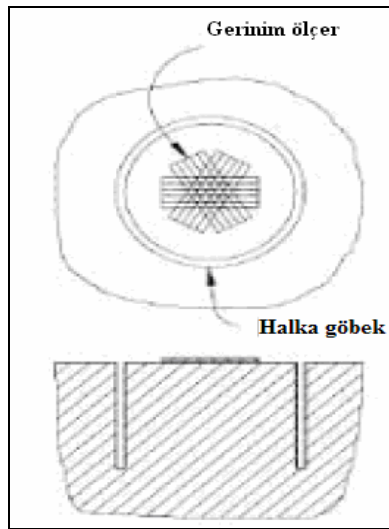


Şekil 6.1. Delik delme yöntemi [30].

Yöntemin kullanımı kolay ve çabuktur, maliyeti azdır. Ayrıca bir çok malzeme çeşitlerine uygulanabilirliği, güvenilir sonuçlar vermesi, daha az özel ekipman gerekmesi, ölçüm tesisatının taşınabilir olması ve numuneye az zarar vermesinden dolayı bu yöntem kullanışlıdır [30, 31].

6.1.3. Halka çekirdek yöntemi

Halka çekirdek yöntemi, delik delme yönteminin değişik bir biçimidir. Bu yöntemde delik delme yöntemindeki gibi rozet içerisinde bir delik delinmesi yerine rozetin dış kenarı civarında çevresel bir kanal açılmaktadır. Bu yöntem genel olarak 0,1-6 mm derinlikteki kalıntı gerilmeleri ölçebilmektedir. Halka çekirdek yöntemi Şekil 6.2’de şematik olarak verilmektedir.



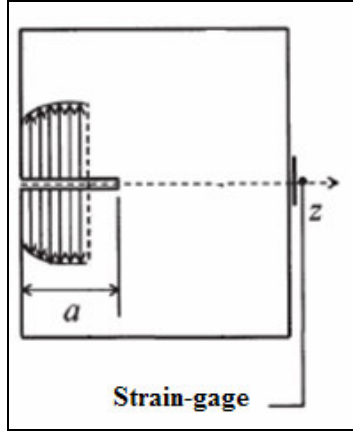
Şekil 6.2. Halka çekirdek yöntemi [30].

Bu yöntemle delik delme yöntemine göre daha büyük gerinme gevşemeleri dolayısıyla malzemenin akma gerilmesinin üzerindeki kalıntı gerilmeler hassas olarak ölçülebilmektedir. Ayrıca delik delme sırasında ilave kalıntı gerilmeler oluşabilirken, bu yöntemde genellikle oluşmamaktadır ve hassasiyeti delik delme yöntemine göre daha yüksektir [30, 31].

6.1.4. Kanal açma yöntemi

Kanal açma yönteminde, kalıntı gerilmeleri belirlemek için numune üzerine küçük bir kanal açılmaktadır. Kanalın açılması ile kanala dik kalıntı gerilmeler gevşemektedir. Bunun sonucunda numune içindeki gerilmeler yeniden

dengelemek ve kanal bölgesinde oluşan kanala dik gerinme gevşemeleri gerinim ölçer kullanılarak ölçülmektedir [30, 31]. Kanal açma yönteminin şematik görünümü Şekil 6.3'te görülmektedir.

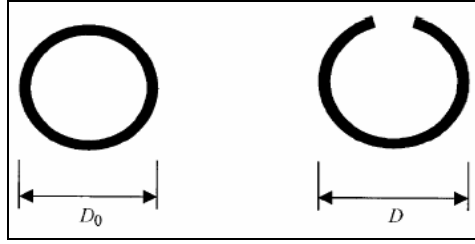


Şekil 6.3. Kanal açma yöntemi [30].

Yöntemin uygulanması basit ve çabuktur. Özellikle yerel kalıntı gerilmelerin ölçümünde iyi hassasiyet göstermektedir. Ayrıca değişik geometrili malzemelerdeki kalıntı gerilmeler başarıyla ölçülebilmekte ve iyi bir derinlik- gerilme çözünürlüğüne ve hassasiyetine sahiptir. Ancak bu yöntem kanal doğrultusuna dik kalıntı gerilmeleri ölçebilmekte ve strain-gagelerin ve kanalın standart bir düzeni yoktur [30, 31].

6.1.5. Tüp yarma yöntemi

Bu yöntemde, ilk olarak kısa bir tüp numunenin ilk dış çapı ölçülmektedir. Daha sonra tüp uzunluğu boyunca kesilerek yarık açılmaktadır. Çevresel gerilmelerin gevşemesi, tüpün dış çapının değişerek açılmasına veya kapanmasına neden olur. Sadece tek bir ölçüm kalıntı gerilmelerin tahminini vermektedir. Şekil 6.4.'te Tüp yarma yöntemi verilmektedir.

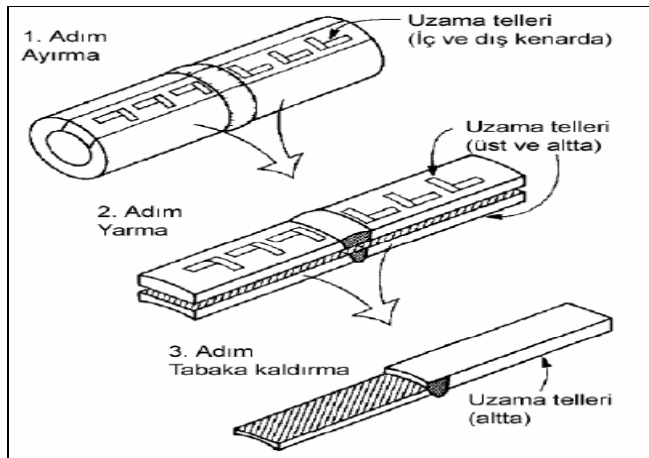


Şekil 6.4. Tüp yarma yöntemi [30].

Ölçme işleminin hızlı ve basit olması tüp yarma yöntemini çok kullanışlı bir kalıntı gerilme belirleme yöntemi yapmaktadır. Ancak bu yöntemin kullanım alanı tüpler ile sınırlıdır [30, 31].

6.1.6. İnce kesitlere ayırma yöntemi

İnce kesitlere ayırma yönteminde numune içerisindeki kalıntı gerilmeler numunedan parçalar kaldırılarak ölçülmektedir. Kalıntı gerilmeleri belirlemek için numune değişik kesitlere sıralı olarak kesilir. Ayırma, yarma ve tabaka kaldırma işlem adımlarının birleştirilmesi, ilgilenilen bölge boyunca kalıntı gerilmelerin detaylarını belirlemede büyük esneklik sağlamaktadır. Tabaka kaldırma adımı bu gerilmeleri açığa çıkarır. Strain-gage sayesinde ortaya çıkan gerinimler ölçülür. Şekil 6.5'te İnce kesitlere ayırma yöntemi gösterilmiştir [30, 31].



Şekil 6.5. İnce kesitlere ayırma yöntemi [30].

6.2. Tahribatsız Muayene Yöntemleri

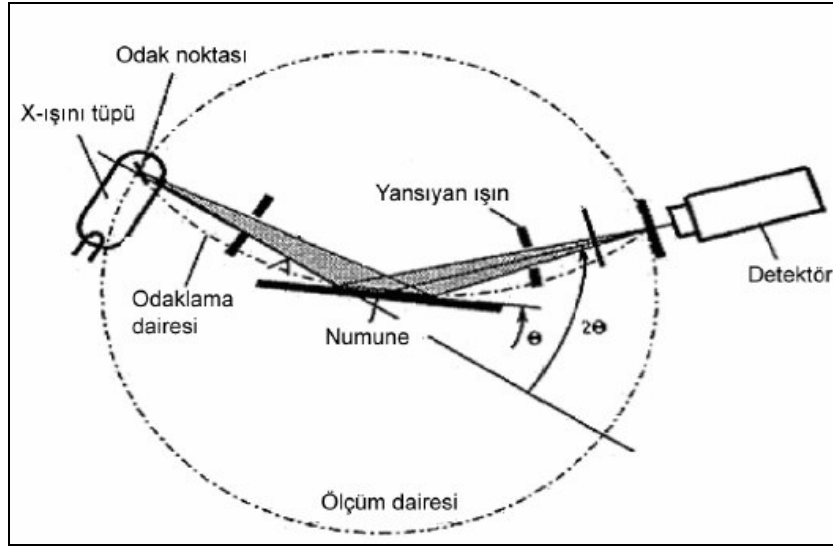
Kalıntı gerilmelerin ölçümleri için tahribatlı testler uzun zamandır verimli olarak kullanılmaktadır. Fakat bu yöntemlerin, ölçüm yapılacak malzemeye zarar vermesi ve çalışan parçalara uygulanmasındaki zorluklar nedeniyle günümüzde tahribatsız tekniklerle kalıntı gerilme ölçme yöntemleri uygulamaları yaygınlaşmaktadır [32].

6.2.1. Kırınım yöntemleri

Kırınım yöntemleri yalnızca kristal yapıli malzemelere veya malzemedeki kristal fazlara uygulanabilir. Bu yöntemler, kristal yapıli bir malzeme gerilmeye maruz kaldığı zaman malzemenin kristal kafes düzlemleri arasındaki mesafelerde meydana gelen değişimlerin incelenerek kafes gerinimlerinin ölçülmesi esasına dayanmaktadır. Kırınım yöntemlerinin uzaysal ve nüfuziyet çözünürlüğü mekanik yöntemlerden daha fazladır. Ancak mekanik yöntemler için gerekli deney süresi kırınım yöntemlerinden daha kısadır. X-ışını, şiddetli X-ışını ve Nötron kırınımı yöntemleri en çok kullanılan kırınım yöntemleridir [30].

X-ışını Kırınımı

X-ışını kırınımı (XRD) yöntemi, parçadaki kalıntı gerilme seviyesini belirlemek amacıyla yaygın olarak kullanılan bir tahribatsız muayene yöntemidir. XRD yöntemi sayesinde kafes düzlemleri arasında meydana gelen bu mesafe değişimleri ölçülebilmektedir. Parça üzerinde seçilen bir bölge X-ışınları ile tekrarlı olarak taranmaktadır. Kristal düzlemler yüzeye nüfuz eden X-ışınlarının çoğunu Bragg Kanunu'na göre kırmaktadır. Bragg Kanunu paralel atom düzlemleri arasındaki mesafeyi hesaplamak için kullanılmaktadır. Yöntem, mikro ve makro kalıntı gerilmeleri tahribatsız olarak belirleyebilen tek yöntemdir. Milimetre seviyesinde yüksek uzaysal çözünürlüğe ve mikron seviyesinde nüfuziyet çözünürlüğüne sahiptir. 50 µm derinliğe kadar var olan kalıntı gerilmeler ölçülebilmektedir [30, 33]. Şekil 6.6'da Geleneksel XRD yöntemi görünmektedir.



Şekil 6.6. Geleneksel XRD yöntemi [30].

Şiddetli X-ışınları Kırınımı

Yöntemin esası XRD yöntemi ile aynıdır. Senkrotron veya şiddetli X-ışınları çok şiddetli yüksek enerjili X-ışınları sağlamaktadır. Bu X-ışınları geleneksel X-ışınlarından daha derinlere nüfuz edebilmektedir. Bu nüfuziyet çoğu malzemede 1-2 mm ve alüminyumda yaklaşık 50 mm kadar olabilmektedir [30].

Nötron Kırınımı

Nötronların nüfuziyeti X-ışınlarının nüfuziyetinden hemen hemen 1000 kat daha fazladır. Bu nedenle Nötron kırınımı yöntemi ile çoğu mühendislik malzemelerinin daha derinlerine nüfuz edilebilmektedir ve dolayısıyla yöntem yöntem 4-50 mm gibi daha büyük nüfuziyet derinliğine sahiptir [30].

6.2.2. Ultrasonik yöntemler

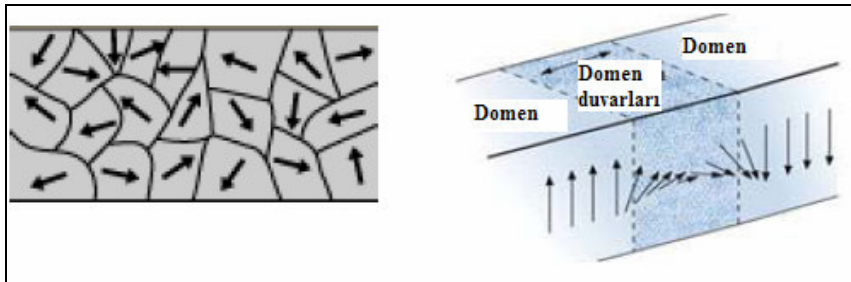
Ultrasonik yöntemler, bir katı boyunca hareket eden ses ötesi (ultrason) dalga hızlarının katı içerisindeki mevcut gerilme seviyelerine duyarlılığından faydalanmaktadırlar. Parçadaki mevcut kalıntı gerilmelerin doğrultuları ve

büyüklikleri malzemedeki ses ötesi dalga hızlarının değişimine doğrudan etki etmektedir. Yani bir malzemenin gerilmeli durumunda ilettiği ses ötesi dalga hızı, malzemenin gerilmesiz durumundaki ses ötesi dalga hızına göre değişecektir. Malzeme elastik olarak davrandığı sürece, dalga hızı malzemedeki kalıntı gerilme durumuna bağlıdır [30].

6.2.3. Manyetik yöntemler

Çeliklerin ve diğer ferromanyetik malzemelerin manyetik özellikleri, mıknatıssal büzülme ve manyetoelastik etkilerden dolayı malzemedeki iç gerilme durumuna duyarlıdır. Bu yöntem gerilme ve mıknatıslanma arasındaki etkileşime dayanmaktadır. Parçadaki gerilme durumuna bağlı olarak parçanın elektromanyetik özellikleri değişmektedir. Parçadaki gerilme durumu elektromanyetik özelliklerin değişiminin ölçülmesi ile belirlenebilmektedir [30, 32].

Şekil 6.7’ de görüldüğü gibi ferromanyetik malzemeler, içlerinde manyetik dipollerin olduğu küçük küçük bölgelerden oluşurlar. Bu bölgelere domen adı verilir. Domenler birbirlerinden domen duvarları sayesinde ayrılırlar. Domenler ferromanyetik malzeme içinde mıknatıslanmanın homojen olarak dağıldığı bölgelerdir. Bu bölgeler içerisinde, manyetik dipol aynı yönde yönelerek domen sınırlarını belirlerler. Domenler içindeki iki farklı yöne yönelmiş olan manyetik dipoller bu duvarlar içerisinde birinden diğerine doğru yön değiştirirler [32].



Şekil 6.7. Ferromanyetik malzeme içerisindeki domenler ve manyetik dipoller [32].

6.2.4. Fotoelastisite analiz yöntemi

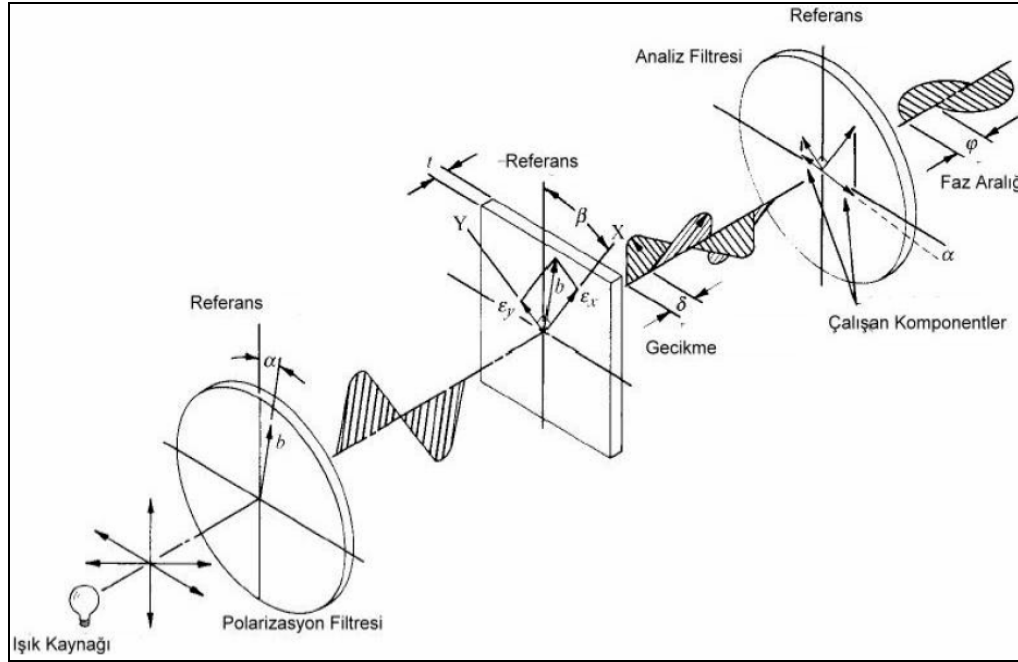
Tanım ve Tarihçesi

Fotoelastisite, yüzeye plastik bir madde tatbik etmek ve fotoelastisite tekniğini kullanmak suretiyle yapılarda muhtelif yüklerin meydana getirdiği gerilmeleri ve bu gerilmelerin yayılma şeklini bulma metodudur. İlk defa Fransa’da 1930 yılında Mesnager tarafından ortaya atılan bu metod sonraları Almanya, İngiltere ve Amerika’da geliştirilmiş; bilhassa 1956’dan sonra Amerika’nın laboratuvar ve endüstri kollarında geniş miktarda kullanılmaya başlanmıştır [34].

Fotoelastik gerilme analizleri, polarize ışık altında bazı transparan malzemelerin oluşturduğu renkli desenlerin gözlenmesi olarak açıklanabilir. Bu yöntemle karışık yapılar içinde oluşan mekanik iç baskı ve gerilmeleri gözle görülebilir ışık taslakları haline dönüştürülebilir. Polarize ışık demeti yüklenmiş, üzerine kuvvet uygulanmış fotoelastik bir malzemeden geçerken, malzemeyi farklı hızlarda kat eden dikey titreşimlere dönüşür. Buna fotoelastik etki denir. Bu durum polarize filtre veya polariskop yardımıyla gözlenebilir [35]. En büyük avantajı model yapmaya gerek kalmadan doğrudan doğruya yük altındaki kiriş-kolon gibi yapıların üstündeki gerilmeleri göstermesidir. Optik aletlerle incelen yüzeyde görülen muhtelif renklere göre deformasyonlar ve bu deformasyonlara tekabül eden gerilmeler hesaplanır. Fotostres her çeşit yük altında herhangi bir yüzeye tatbik edilebilir ve ortam sıcaklığı -55 °C ile 160 °C arasında olmalıdır [34].

Fotoelastik Analiz Yönteminin Temel Esasları

Fotoelastik yöntem, modeldeki gerilmelerin görülebilir olmasını sağlamaktadır. Bu gerilmelerin görünür olmasını sağlayan cihaza polariskop denir. Polariskobu oluşturan ana yapılar polarize filtre ve ışık kaynağıdır. Bu tip polariskoba düzlemsel polariskop denir. Şekil 6.8’de ışığın polarizasyonu görünmektedir.



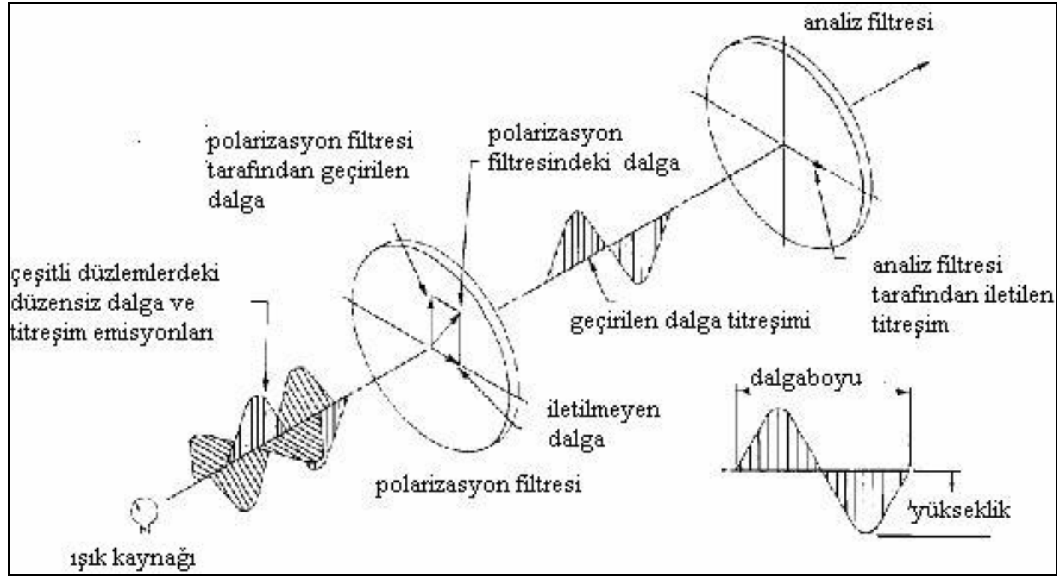
Şekil 6.8. Işığın polarizasyonu [35].

Işık radyo dalgalarına benzer elektromanyetik titreşimdir. Akkor halindeki bir kaynak her yöne dağılan, çeşitli frekans ya da dalga boylarına sahip enerji yayar. Bu spektrum içinde 400–800 nm arası dalga boyları insan gözü tarafından algılanabilir. Işığa eşlik eden titreşim yayılma doğrultusuna diktir. Ancak kaynağın önüne konulan bir polarize filtreyle titreşimlerin sadece bir bölümü geçebilecektir. Bu şekilde polarize edilen ışın düzlemsel polarize olarak adlandırılır. Çünkü titreşim düzlem üzerindedir [35]. Şekil 6.9’da düzlemsel polariskop gösterilmiştir.

Fotoelastik malzemede kırmızı ve yeşil renkler arasındaki kuvvet çizgileri fringe olarak tanımlanır. Kuvvet çizgilerinin sayısı arttıkça gerilmede oransal olarak artar. Bu renkli bantlar veya kuvvet çizgileri birbirine yaklaştıkça, gerilme değişimi fazla olur. Düzenli renk görünümü ise düzenli dağılım gösteren gerilme alanlarını ifade eder [35].

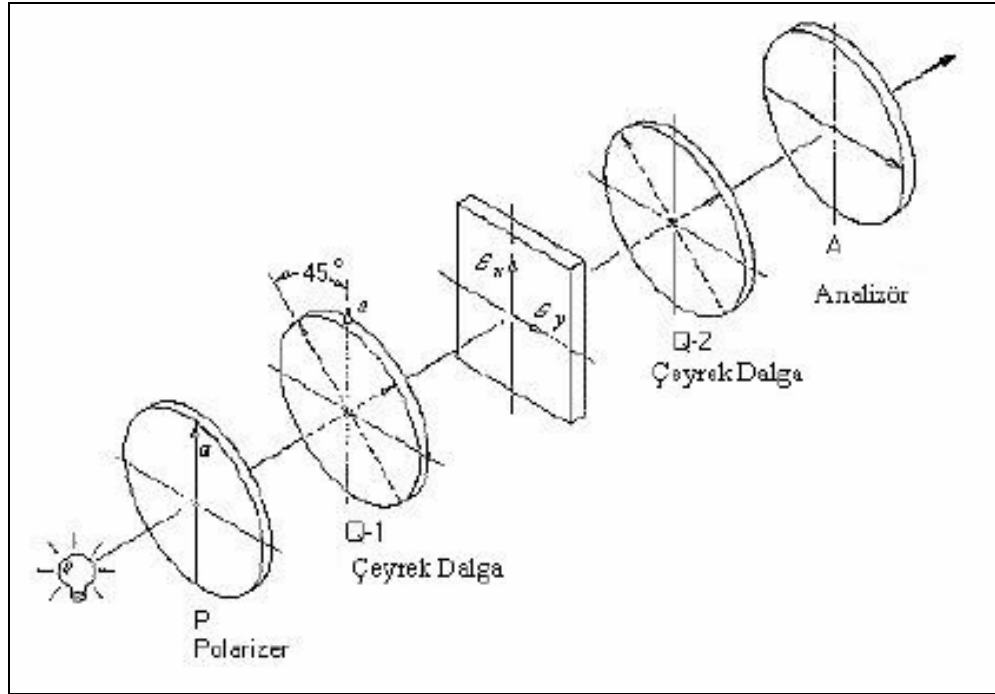
Genel olarak düzlemsel polariskopta iki tip çizgi vardır. Yukarıda da belirtildiği gibi bunlardan birincisi belirli renk çizgilerinin sıralı olarak gözlendiği alanlardır. Bunlara izokramatik kuvvet çizgisi denir ve gerilmenin yoğunlaştığı bölgelerde gözlenir.

Diğeriye polariskopta siyah olarak görülen alanlardır ve bunlara izoklinik kuvvet çizgisi denir. Bu kuvvet çizgileri gerilmelerin yönleriyle ilgilidir ve izokromatiklerle üst üste binebilirler [35].



Şekil 6.9. Düzlemsel polariskop [35].

Modelin iyi analiz edilebilmesi ve görüntü alınabilmesi için izokromatik kuvvet çizgilerinin net olarak gözlenmesi gerekir. Bu nedenle izokromatik kuvvet çizgilerinin görülmesini kolaylaştırmak için izokliniklerin elimine edilmesi gerekir. İzokliniklerin eliminasyonu sirküler polariskop ile gerçekleştirilebilir ve bunun filtresi çeyrek dalga tabakası olarak adlandırılır. Bu filtre sayesinde ışığın bir kısmının rotasyonu engellenir ve izoklinik kuvvet çizgileri etkisiz duruma getirilir [35]. Şekil 6.10'da sirküler polariskobun çalışma düzeni verilmiştir.



Şekil 6.10 Sirküler polariskop çalışma düzeni [35].

Fotoelastik analiz yönteminde bir diğer önemli konuda modele uygulanan yük miktarıdır. Kuvvet ne kadar arttırılırsa izokromatik kuvvet çizgisi sayısı da o oranda artış gösterecektir. Kuvvet miktarının arttırılmasıyla kuvvet çizgilerinin şekil ve dağılımında farklılık gözlemlenmeyebilir.

İzokromatik gerilmeler göz önüne alındığında yorum için iki temel prensip kullanılır. Birincisi; gerilme yoğunluğu arttıkça kuvvet çizgilerinin sayısı artar. İkincisinde ise; izokromatik kuvvet çizgilerinin birbirine yakınlığı ne kadar artarsa o oranda gerilme yoğunluğu fazla anlamına gelmektedir. Gerilme yoğunluğu genel olarak üç durumda oluşur. Bunlar;

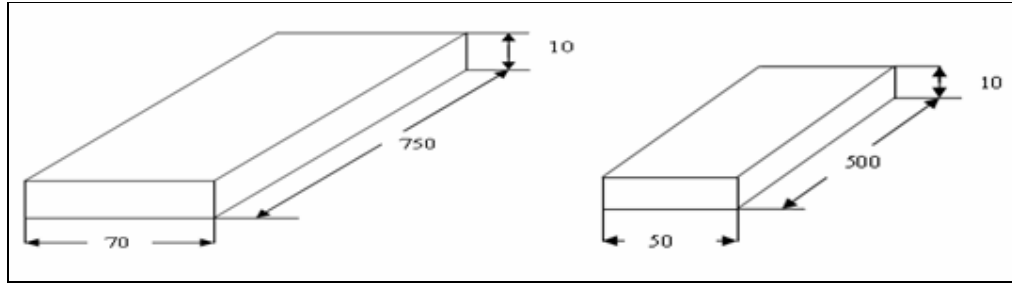
- 1) Bir cismin diğerine baskı yapması
- 2) Cismin geometrik devamının bozulması (sıkma, bükme, germe, delik gibi)
- 3) Cismin iki parçası arasında elastik modülüs farkının olması [35].

7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

7.1. Deney Malzemeleri

7.1.1. Malzeme

Deneylerde, $500 \times 50 \times 10$ mm ve $750 \times 70 \times 10$ mm boyutlarında yarı mamül lama malzemeler kullanılmıştır (Şekil 7.1).



Şekil 7.1. Deney malzemesi boyutları

Kullanılan malzemeler, standart Fe 37 (St 37) yapı çeliğidir. Malzemelerin kimyasal bileşimi Çizelge 7.1’de verilmiştir.

Çizelge 7.1. Deneyde kullanılan lama malzemelerin kimyasal kompozisyonu

Boyutlar (mm)	Kimyasal bileşim (% Ağırlıkça)					
	C	Si	S	P	Mn	Kalan
50×10	0,16	0,21	0,022	0,015	0,48	Fe
70×10	0,16	0,25	0,023	0,017	0,48	Fe

Deneyler sırasında 50×10 mm boyutlarındaki lama malzemenin kesit alanı daha küçük olduğu için, kaynak dikişlerinin boyutlandırılmasında, bu malzemenin mekanik özellikleri dikkate alınmıştır. Bunun için 50×10 mm boyutlarındaki lama malzemenin TS 138 standardına göre üç adet çekme numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin, G.Ü.T.E.F. Metalurji Eğitimi Bölümü, Malzeme Anabilim Dalı’nda bulunan Instron 8503 marka universal çekme test cihazı

kullanılarak mekanik özellikleri belirlenmiş ve Çizelge 7.2’de verilmiştir.

Çizelge 7.2. 50×10 mm boyutlarındaki yarı mamül lama malzemenin mekanik özellikleri

Akma mukavemeti σ_a (N/mm²)	Çekme mukavemeti σ_c (N/mm²)	Kopma mukavemeti σ_k (N/mm²)	Homojen uzama (%)	Kopma uzaması (%)
304,3	474	376,6	24,62	37,3

7.1.2. Kaynak teli

Dolgu malzemesi (ilave metal) olarak 1 mm çapında SG2 (TS 5618, DIN 8559) kaynak teli kullanılmıştır. SG2 kaynak teli; çelik konstrüksiyon ve makine imalatında, gemi, kazan, tank, boru ve ince çeliklerin kaynaklarında kullanılabilmektedir [36]. Kullanılan kaynak telinin kimyasal kompozisyonu Çizelge 7.3’te ve mekanik özellikleri Çizelge 7.4’te verilmiştir.

Çizelge 7.3. Kaynak telinin kimyasal bileşimi (% Ağırlıkça) [36]

C	Si	Mn
0,10	0,85	1,45

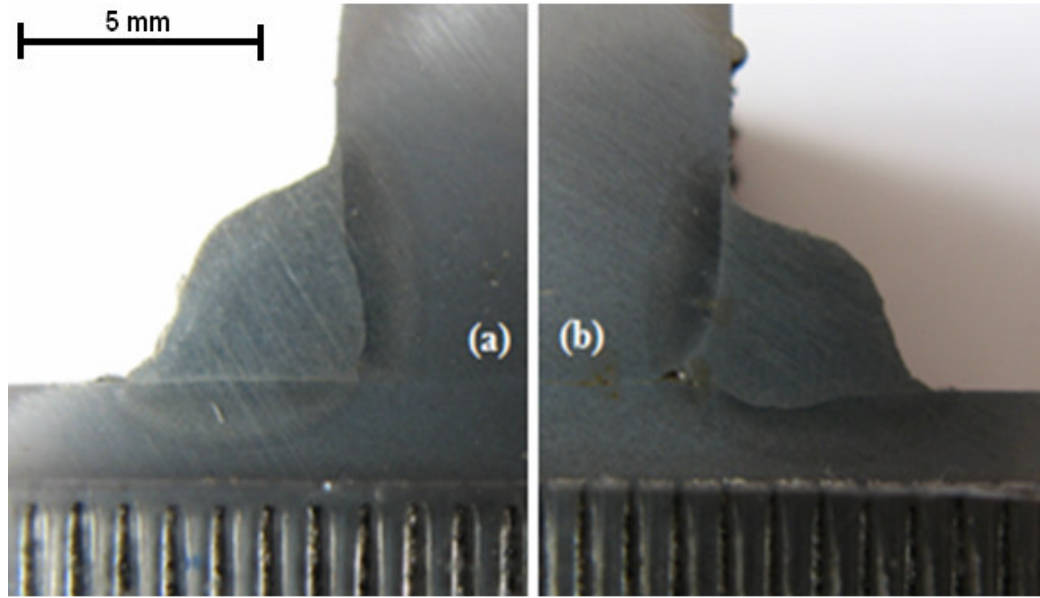
Çizelge 7.4. Kaynak telinin mekanik özellikleri [36]

Akma mukavemeti σ_a (N/mm²)	Çekme mukavemeti σ_c (N/mm²)	Homojen uzama (%)
min. 420	540–640	min. 22

7.1.3. Koruyucu gaz

Kaynaklı birleştirme yöntemi ile üretilecek numunelerde, kaynak dikişlerinin nüfuziyetini belirleyebilmek amacı ile ön deneyler yapılmıştır. Öngerilmelerin

serbest bırakılması ile kalıcı gerilmelerin kaynak dikişi üzerinde oluşmasını sağlamak amacıyla birleştirmeler için köşe kaynak dikişi tercih edilmiştir. Ön deneylerde ilk olarak HB 205 karışım gazı (% 93 Ar, % 5 CO₂, % 2 O₂) kullanılmıştır. Kullanılan numunelerin kalın kesitlere sahip olması nedeniyle alt lamada nüfuziyet problemiyle karşılaşmıştır (Resim 7.1.a).



Resim 7.1. Farklı karışım gazlarında oluşan nüfuziyet görüntüleri, a) HB 205 karışım gazı, b) HB 220 karışım gazı

Yapılan literatür araştırmasında, kalın kesitlere sahip malzemelerde koruyucu gaz olarak HB 220 karışım gazının daha derin nüfuziyet veren dikişlerin eldesi için kullanıldığı belirtilmektedir [37]. Yapılan ön deneylerde HB 220 karışım gazının kaynak dikişlerinde daha derin nüfuziyet oluşturduğu belirlenmiştir (Resim 7.1.b). Bu nedenle deneylerde HB 220 karışım gazı kullanılmıştır. HB 220 karışım gazının kimyasal oranı Çizelge 7.5’te verilmiştir.

Çizelge 7.5. HB 220 koruyucu gazın karışım oranları (% Ağırlıkça)

Ar	CO ₂	O ₂
78	20	2

7.2. Metot

7.2.1. Deney cihazları

Yatay Pozisyonlu Çekme Cihazı ve Kaynak Makinesi

Numunelerde ön gerilme oluşturabilmek için G.Ü.T.E.F. Metal Eğitimi Bölümü Mekanik Metalurji A.B.D. Laboratuvarında bulunan, yatay pozisyonda çekme yapabilen 30 ton kapasiteli özel yapım çekme test cihazı kullanılmıştır (Resim 7.2).

Kaynak dikişleri MIG-MAG 300 Compact tipi gazaltı kaynak makinesi ile gerçekleştirilmiştir. Kaynak işlemlerinin sabit bir hızda yapılabilmesi için tek eksenli hareket edebilen robotik bir sistem tasarlanarak üretilmiş ve bu sistem yatay pozisyonlu çekme cihazının üzerine monte edilmiştir. Cihazın kontrol ünitesinde bulunan potansiyometre ile kaynak hızı 0 ile 800 mm/dak arasında ayarlanabilmektedir. İstenilen hızlarda yaklaşık 1000 mm uzunluğunda alın ve köşe kaynak dikişleri çekilebilmektedir (Resim 7.2).



Resim 7.2. Yatay çekme deney cihazı ve kaynak ünitesi

Çekme Test Cihazı

Kaynak dikişlerinde oluşturulan kalıntı gerilmelerin birleştirmenin çekme/makaslama dayanımına etkilerini tayin edebilmek için G.Ü.T.E.F. Metal Eğitimi Bölümü Malzeme A.B.D’de bulunan Instron 8503 marka universal test cihazı kullanılmıştır.

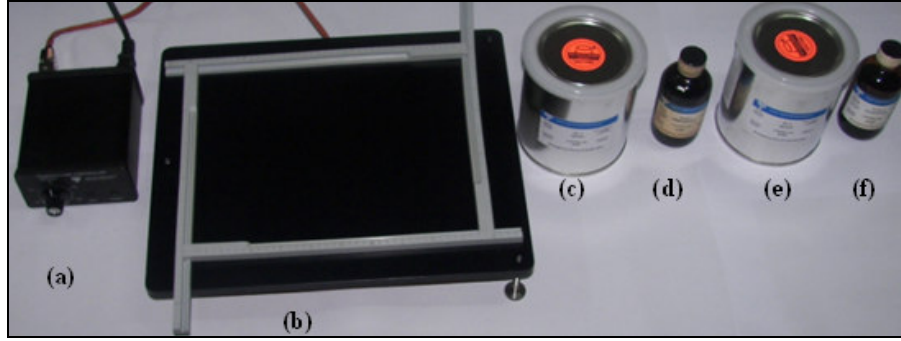
Fotoelastisite Cihazı ve Malzemeleri

Bu çalışmada, kalıntı gerilmelerin varlığını tespit edebilmek için fotoelastisite tekniğinden faydalanılmıştır. Deneylerde, çelik malzemeler için önerilen, PL 1 (Resin) ve PLH 1 (Sertleştirici) fotoelastik kaplama malzemesi olarak kullanılmıştır. Kaplama malzemesini kalıntı gerilme tayini yapılacak malzemeye yapıştırmak için ise PL 1’ in katalizörü olan PC 1 (Resin) ve PCH 1 (Sertleştirici) kullanılmıştır [38]. PL 1’in bazı fiziksel özellikleri Çizelge 7.6’da verilmiştir.

Çizelge 7.6. PL 1 fotoelastik resinin bazı fiziksel özellikleri [38]

Kaplama malzemesi yoğunluğu (gr/ inç²)	18,5
Optik gerinme katsayısı (K)	0,094
Uzama oranı (GPa)	% 3–5
Elastik modülü	2,9
Poisson katsayısı	0,36
Hassas olduğu sıcaklık (°C)	82
Kullanılabilen maksimum sıcaklık (°C)	232

Resim 7.3’te Fotoelastisite tekniğinde kullanılan cihaz ve malzemeler görünmektedir.



Resim 7.3. Kaplama malzemesi üretimde kullanılan cihaz ve malzemeler; a) Isıtıcı kontrol ünitesi, b) Isıtıcı tabla, c) Resin (PL 1), d) Sertleştirici (PLH 1), e) Resin (PC 1), f) Sertleştirici (PCH 1)

Fotoelastisite tekniğinde kaplama malzemesi üretmek için birçok yardımcı araç ve gereç kullanılmıştır. Bunlar;

- 1) Hassas elektronik terazi
- 2) Isıtıcı
- 3) Termometre
- 4) Laboratuvar eldiveni
- 5) Plastik ve kâğıt bardak, tahta karıştırıcı
- 6) Aseton
- 7) Gazlı bez
- 8) Teflon plaka

Ölçümü yapılacak numunelere kaplama malzemesi yapıştırıldıktan sonra Resim 7.4'te gösterilen fotoelastisite cihazı kullanılarak gerekli ölçümler yapılabilir.



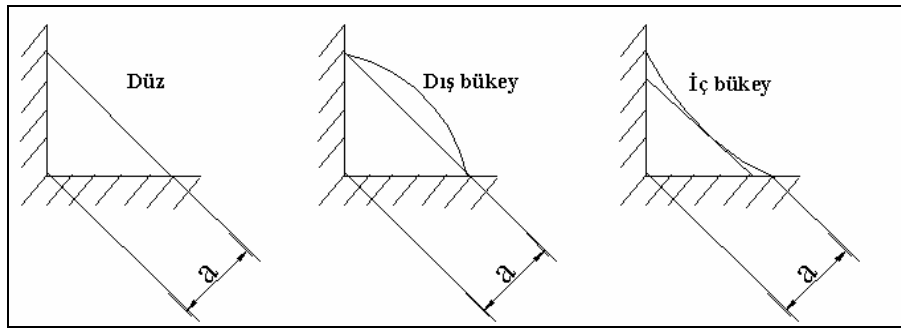
Resim 7.4. Fotoelastisite ölçüm cihazı

7.2.2. Kaynak parametreleri ve kaynak dikişi boyutlandırması

Öngerilme sonucu, kaynakta oluşacak kalıntı gerilmelerin, kaynağın mekanik özelliklerine etkilerini belirleyebilmek için, birleştirilen numuneler çekme/makaslama testine tabi tutulmuştur. Çekme testi, numunelerdeki köşe kaynaklarda makaslama gerilmesi meydana getireceğinden, kullanılan lama malzemelerde akma oluşmadan, kaynak dikişlerinde kesilme meydana gelmesi gerekmektedir. Bunun için kesit alanı küçük olan 50×10 mm boyutlarındaki lama malzemenin kesit alanı ve akma dayanımı dikkate alınarak kaynak dikişlerinin boyutlandırılması yapılmıştır.

Durağan (statik) yüklemelere maruz çelik yapılarda kaynak dikiş kalınlığı olan “a” parametresi minimum 3 mm, maksimum $a \leq 0,7 \times t_{\min}$ ($a \leq 7$ mm) olmalıdır [8, 39]. Bu çalışmada nüfuziyet oluşması dikkate alınarak maksimum kaynak uzunluğu oluşturabilmek için dikiş kalınlığı $a = 3,4$ mm alınmıştır.

Kaynak işlemi sırasında birleştirme bölgesine gelecek ısı girdisi numunelerin akma dayanımı düşüreceğinden, en az ısı girdisi sağlayan düz köşe dikiş formu seçilmesi düşünülmüştür. Ancak yapılan ön deneylerde düz köşe kaynak dikiş formu sağlayan HB 205 gaz karışımı yetersiz nüfuziyet sağladığından HB 220 gaz karışımı kullanılmıştır. HB 220 gaz karışımı yeterli nüfuziyet sağlamıştır, ancak kaynak dikişinin bir miktar dış bükey formda oluşmasına neden olmuştur. Kaynak dikiş geometrileri Şekil 7.2’de gösterilmektedir.



Şekil 7.2. Köşe kaynak dikiş geometrileri [39]

Akma dayanımı dikkate alınarak malzemeye uygulanabilecek maksimum yük oranı “Eş. 7.1, 7.2, 7.3 ve 7.4” kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma_a = \frac{P_{\max}}{A_{lama}}$$

(7.1)

$$304,3N/mm^2 = \frac{P}{500mm^2}$$

$$P = 152150N$$

Fe37 malzeme için köşe kaynaklarında emniyet gerilme değeri (τ_k) 110 N/mm² olduğundan kaynak uzunluğu hesaplanırken bu değer dikkate alınarak hesaplanmıştır [39]. Kaynak dikişi kesme gerilmesi;

$$\tau_k = \frac{P}{A_k} \quad (7.2)$$

$$A_k = 2 \times a \times L_{toplam} \quad (7.3)$$

$$\tau_k = \frac{P}{2 \times a \times L_{toplam}}$$

Buradan tüm değerler yerine konulursa;

$$110 \text{ N/mm}^2 = \frac{152150 \text{ N}}{2 \times (3,4 \text{ mm} \times L_{toplam})}$$

$$L_{toplam} = 203,4 \text{ mm}$$

Numunelerde iki köşe kaynağı olacağından;

$$\text{Kaynak dikiş uzunluğu} = \frac{L_{toplam}}{2} \quad (7.4)$$

$$= \frac{203,4}{2} \cong 101,5 \text{ mm}$$

Çekme testi sırasında 500 mm² kesit alana sahip üst lama (50×10) kopma olmaması ve kaynak dikişlerinin kesilmesi istendiğinden, kaynak dikişi alanının üst lama malzemesinin alanından küçük olması gerekmektedir. Bunun için;

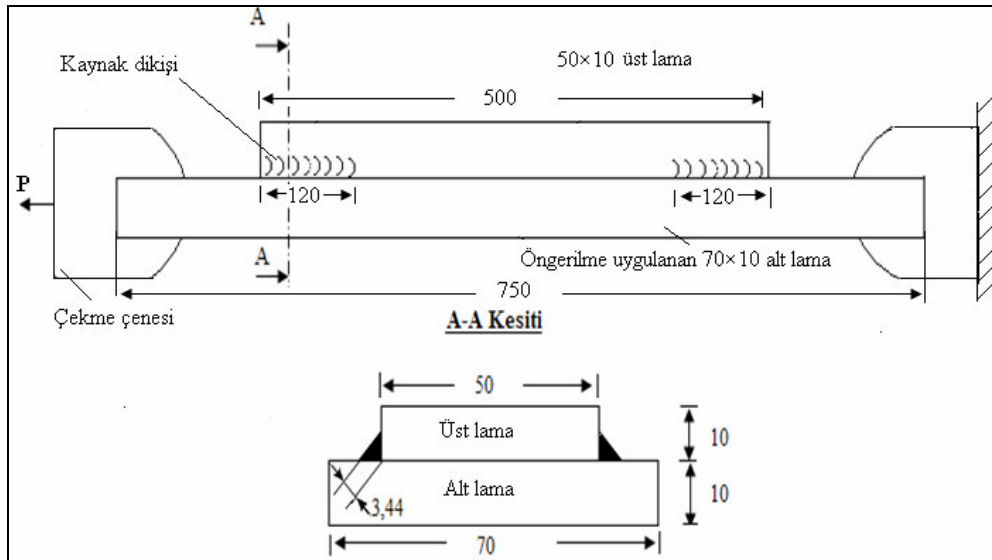
$$(3,4 \text{ mm} \times L_{toplam}) \leq 500 \text{ mm}^2$$

$$L_{toplam} \leq 147 \text{ mm}$$

Kaynak dikişlerinin çekme testinde kesilebilmesi için kaynak dikiş uzunluğu (L_{toplam}) 120 mm alınmıştır. Her köşe dikiş uzunluğu da 60 mm olarak uygulanmıştır.

7.2.3. Numunelerin hazırlanması ve kaynaklı birleştirmenin yapılması

Numuneler, yatay çekme cihazı çenelerinin yaklaşma kapasitesi dikkate alınarak hazırlanmıştır. Daha iyi bir birleşme ve nüfuziyet sağlayabilmek için, istenilen ölçülerde hazırlanan lama malzemelerin yüzeyleri flab (dairesel zımpara taşı) yardımı ile temizlenmiştir. Dört farklı öngerilme uygulanan 70×10 mm boyutlarındaki alt lama malzemeye 50×10 mm boyutlarındaki üst lama malzeme ise Şekil 7.3'te görüldüğü gibi çift taraftan 120 mm'lik köşe kaynağı ile birleştirilmiştir. Bu sayede bir çekme işlemi ile iki adet gerilmeli ikiz numune içeren numuneler üretilmiştir.



Şekil 7.3. Öngerilmeli ikiz numune üretimi

Birleştirmeye uygulanan kaynak parametrelerini tespit edebilmek için ön deneyler yapılmıştır. Yapılan bu ön deneyler sonucunda nüfuziyet ve kaynak formuna en uygun parametreler belirlenmiş ve deneylerde uygulanmıştır. Alt lama (70×10) malzemesinin kalın kesite sahip olması nedeniyle kaynak öncesi yaklaşık 60 °C ön ısıtma uygulanmıştır. Bu sıcaklık alt lama yüzeyine sürülen katı haldeki mumun ergimesine bağlı ölçülmüştür. Kaynak işlemi için seçilen parametreler Çizelge 7.7’de verilmiştir.

Çizelge 7.7. Kaynak parametreleri

Tel sürme (mm/sn)	5,5
Gaz debisi (lt/ dak)	13
Kaynak hızı (mm/sn)	5,5
Voltaj (V)	24
Kök aralığı (mm)	0,5

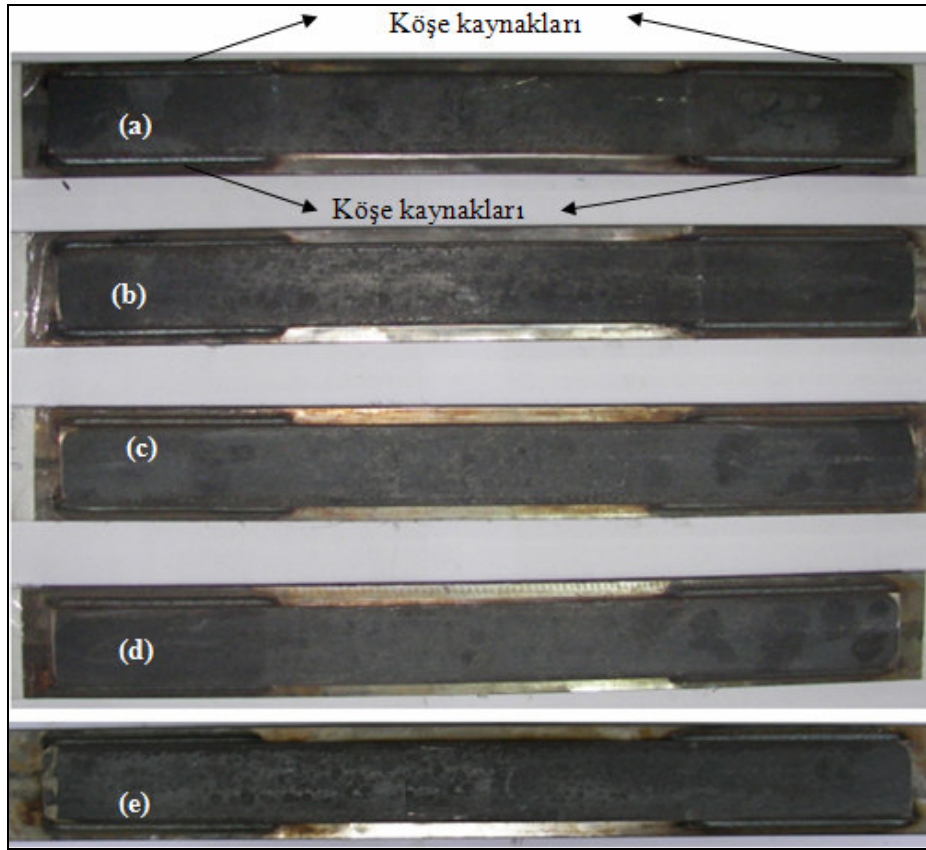
Çizelge 7.8. Kaynaklı birleştirilen alt çekme lamasında oluşturulan öngerilmeler

Numune kodu	Birleştirmeye uygulanan öngerilme (N/mm²)
ÖG-Ø	0
ÖG-91	91
ÖG-148	148
ÖG-194	194
ÖG-222	222

Öngerilme yükleri altında kaynak işlemleri gerçekleştirildiği için, her bir kaynak dikişinden sonra numunenin oda sıcaklığına kadar soğuması beklenmiş ve diğer kaynak dikişi daha sonra çekilmiştir. Bu esnada sisteme uygulanan öngerme kuvvetinde, ısı girdisine bağlı olarak alt lamanın genişmesi sebebiyle, bir miktar azalma meydana gelmiş ancak soğuma sürecinde yine alt lamanın kendini

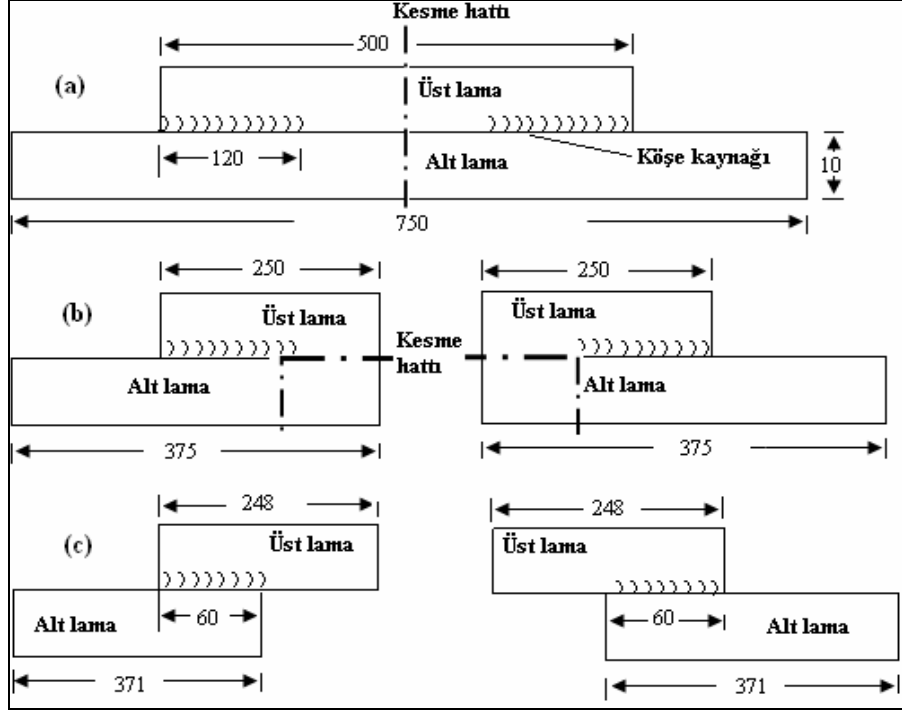
çekmesinden dolayı uygulanan ilk öngerme kuvveti değerlerine yaklaşık % 1 sapma ile ulaşılmıştır. Alt lamaya uygulanan öngerilmeler Çizelge 7.8’de verilmiştir.

Akma dayanımı dikkate alınarak alt lamaya farklı öngerilme yükleri uygulanmıştır. Uygulanan öngerilmeler, kaynak esnasında oluşacak ısı girdisi nedeniyle alt lama malzemedede akma meydana getirmeyecek şekilde seçilmiştir. Üst lama malzemeler, gerilmesiz, 91 N/mm², 148 N/mm², 194 N/mm² ve 222 N/mm²’lik öngerilmeler uygulanmış olan alt lamaya çift taraflı köşe kaynağı (dört adet köşe kaynağı) ile birleştirilmiştir. Resim 7.5’te üretilen ikiz numuneler görünmektedir.



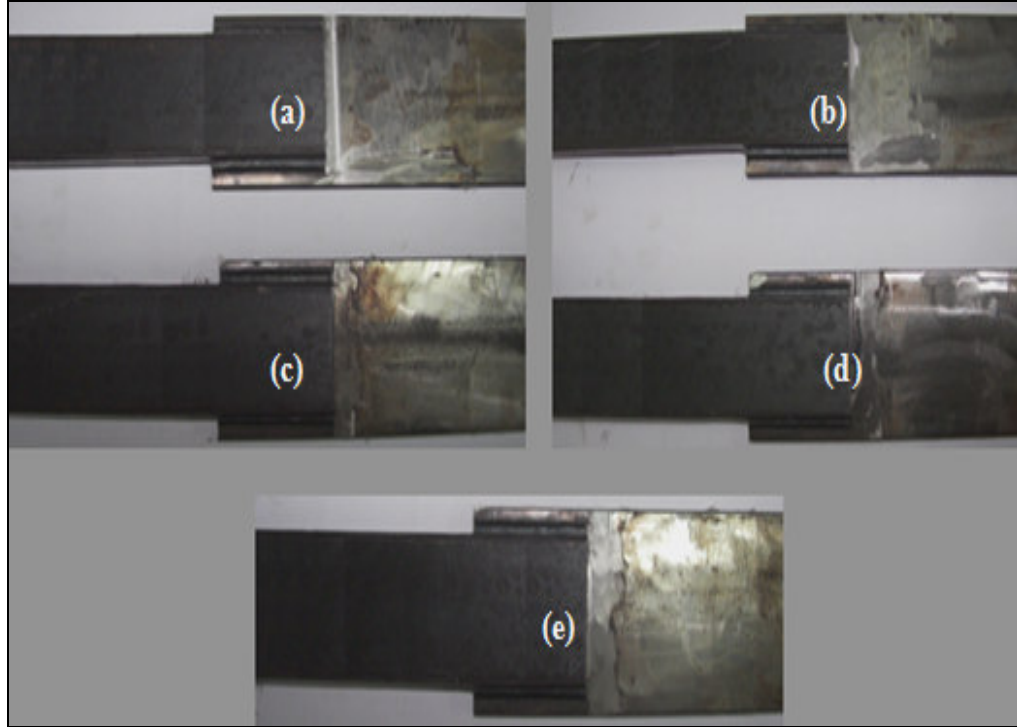
Resim 7.5. Farklı öngerilmeler altında üretilen ikiz numuneler, a) ÖG-0, b) ÖG-91, c) ÖG-148, d) ÖG-194, e) ÖG-222

7.2.4. Numunelerin çekme deneyine hazırlanması



Şekil 7.4. Öngerilmeli çekme numunesi üretim aşamaları, a) İkiz numune (kesme öncesi), b) Kesilmiş ikiz numuneler, c) Kesildikten sonra kalıcı gerilmeli çekme numuneleri (2 adet)

Farklı öngerme yükleri altında kaynak işlemi gerçekleştirilen numunelerde, yükler serbest bırakıldıktan sonra uygulanan öngerilme miktarına bağlı olarak kaynak dikişlerinde kalıcı gerilmeler oluşmuştur. Oluşan kalıcı gerilmelerin kaynak dikişlerinin mekanik özelliklerine etkisinin belirlenmesi için numuneler çekme testine tabi tutulmuştur. Bunun için toplam uzunluğu 750 mm olan numuneler, ilk önce el testeresi yardımıyla iki parçaya bölünmüştür. Bölünen numunelerin kaynak dikiş uzunluklarını hesaplanan uzunluğa getirmek için, kaynak dikişleri freze tezgâhında $\varnothing 10$ mm'lik parmak freze çakısı ile işlenerek 60 mm'ye düşürülmüştür. Frezeleme işlemi sırasında, soğutma sıvısı kullanılarak oluşan ısının etkileri önlenmiştir. Şekil 7.4'te öngerilmeli çekme numunesi hazırlama işlem aşamaları ve Resim 7.6'da ise çekme testi için hazırlanan numuneler görünmektedir.



Resim 7.6. Kalıcı gerilmeli çekme numuneleri; a) ÖG-0, b) ÖG-91, c) ÖG-148, d) ÖG-194, e) ÖG-222

Hazırlanan numuneler Instron 8503 marka universal çekme cihazı vasıtasıyla oda sıcaklığında 1 mm/dak çene hızıyla çekilmiştir. Çekme/makaslama deneyi sonucunda cihazdan σ - ϵ çıktı olarak alınmış ve bu grafik çıktısına göre her numunenin % 0,2 uzama miktarı dikkate alınarak akma gerilmeleri belirlenmiştir. Ayrıca akma noktasında ölçülen elastik + plastik % uzama miktarı belirlenmiştir. Resim 7.7’de çekme testi sırasındaki numune görünmektedir.

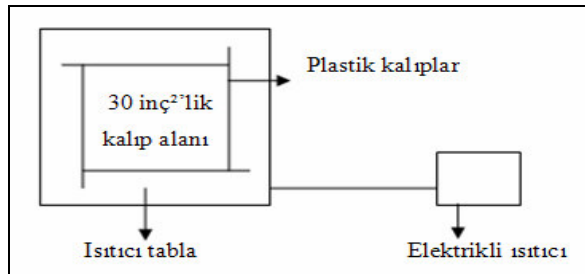
Çekme testi sonucunda numunelerin kopma bölgeleri makro olarak incelenmiş ve kırık yüzeylerin fotoğrafları çekilmiştir.



Resim 7.7. Kalıcı gerilmeli kaynaklı birleştirmelerin çekme deneyi

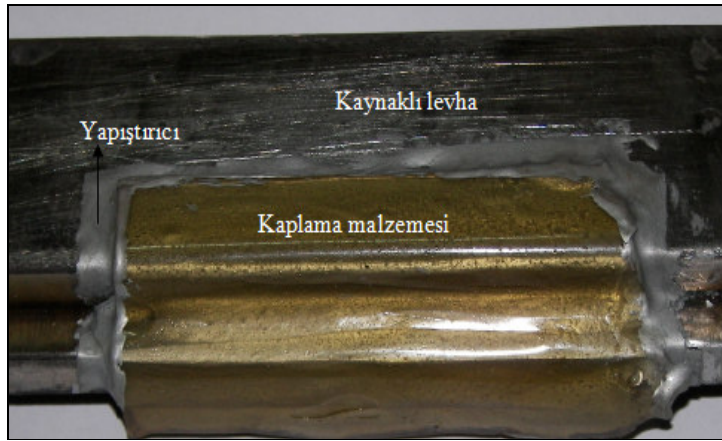
7.2.5. Fotoelastik kaplama malzemesi hazırlanması ve numunelere yapıştırılması

Kaplama malzemesi hazırlamak için önce ısıtıcı tabla düzeneği kurulmuştur. Daha sonra ısıtıcı tabla üzeri Relasing Agent ile yağlanarak üzerine teflon plaka yerleştirilmiştir. Sıvı kaplama malzemesinin teflon plakaya yapışmaması ve kolay ayrılması için teflon tabakanın üzeri de Realesing Agent ile yağlanmıştır. Isıtıcı tablanın sıcaklığı 37 °C'ye ayarlanmış ve bu sıcaklıkta sabitlenmiştir [38, 40]. Isıtıcı tabla üzerinde kaplama malzemesi için hesaplanan genişlik ve uzunlukta kalıp hazırlanmıştır (Şekil 7.5).



Şekil 7.5. Kaplama malzemesi hazırlama düzeneğinin şematik görüntüsü

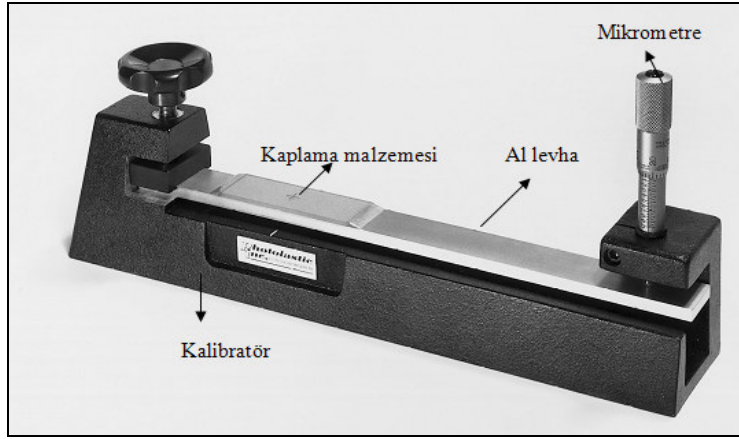
Kaplama malzemesi, 30 inç³ hacim için hazırlanmıştır. Köşelerde oluşabilecek hatalı kısımları daha sonra kesip çıkarabilmek için bir miktar fazla üretilmiştir. Bunun için 25 gr PL 1 ve 5 gr PLH 1 kullanılmıştır. PL 1 ve PLH 1 aynı kapta karıştırılarak, karışım sıcaklığının ekzotermik reaksiyon ile 52 °C'ye çıkması beklenmiştir. Üretilen kaplama malzemesi ısıtıcı tablanın üzerindeki kalıp içerisine dökülmüş ve yaklaşık 30 dakika jel kıvamına gelmesi için beklenmiştir. Hazırlanan kaplama malzemesi kaplanacak kaynak dikişi üzerine jel kıvamındayken tatbik edilmiş ve katılaşması için bir gün beklenmiştir. Daha sonra yapıştırıcı, 20 inç² alan için hazırlanmıştır. Yapıştırıcıyı hazırlarken 12,4 gr PC 1 ve 1,3 gr PCH 1 kullanılmıştır [38, 40]. Hazırlanan yapıştırıcı hem kaplama malzemesine hem de kaplanacak yüzeye fırça yardımıyla sürülmüştür [41]. Daha sonra kaplama malzemesi kaplanacak yüzeye gaz boşluğu kalmayacak şekilde yapıştırılmış ve katılaşması beklenmiştir. Resim 7.8'de kaynak dikişi üzerine kaplanmış fotoelastik kaplama malzemesi görünmektedir.



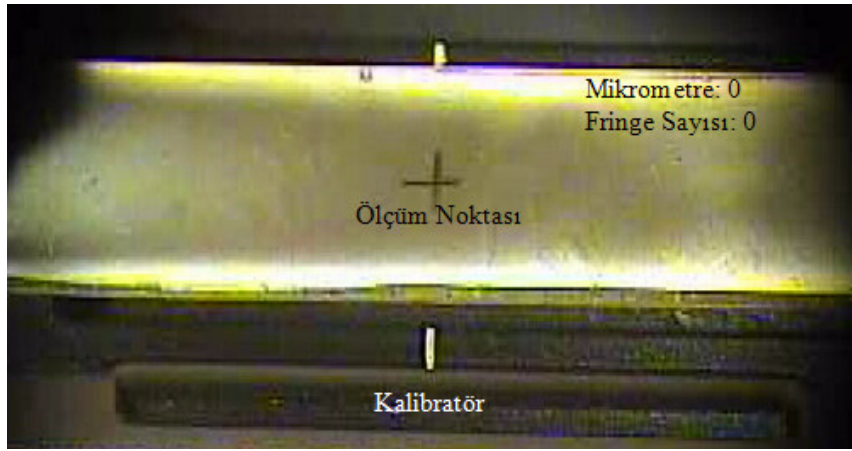
Resim 7.8. Fotoelastik kaplama malzemesi yapıştırılmış gerilmesiz kaynak dikişi

Kaplama malzemesinin kalibrasyonu

Kaynak dikişine yapıştırılan plastik kaplama malzemesinin ilk olarak kalibrasyonu yapılmıştır. Bunun için hazırlanan kaplama malzemesi, boyutları 6,35×25×318 mm olan alüminyum kalibrasyon levhası üzerine yapıştırılmıştır. Kaplama malzemesinin kalınlığı 2,7 mm ve yapıştırıcı kalınlığı 0,6 mm olarak ölçülmüştür. Hazırlanan kalibrasyon çubuğu kalibratöre yerleştirilmiştir (Resim 7.9).

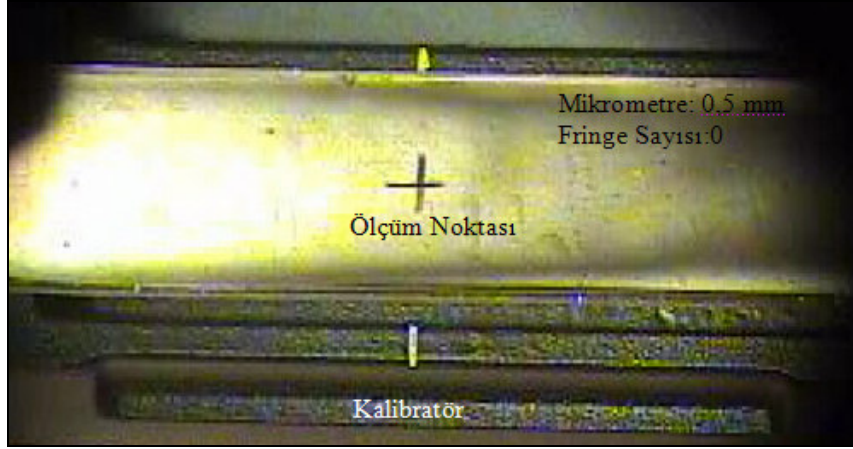


Resim 7.9. Kalibratör ve kalibrasyon levhası

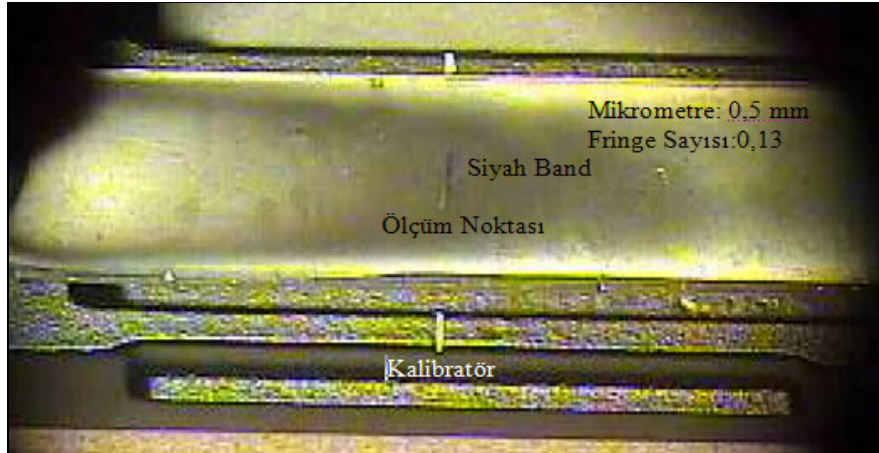


Resim 7.10. Kalibrasyon levhasında ölçüm noktası

Kalibrasyon levhasına yapıştırılan kaplama malzemesi üzerinde ölçüm alınacak bir nokta tespit edilerek işaretlenmiştir (Resim 7.10). Daha sonra bir ucu sabit olan kalibrasyon levhasına kalibratör üzerindeki mikrometre ile bir eğme kuvveti tatbik edilmiş ve konsol kiriş olarak çalışması sağlanmıştır (Resim 7.11). Eğme neticesinde kaplama malzemesi üzerinde uygulanan eğme miktarına bağlı olarak siyah bir band oluşmuştur (Resim 7.12).



Resim 7.11. Mikrometre 0,5 mm eğim oluşturduğu durumda kalibrasyon levhasının görünümü



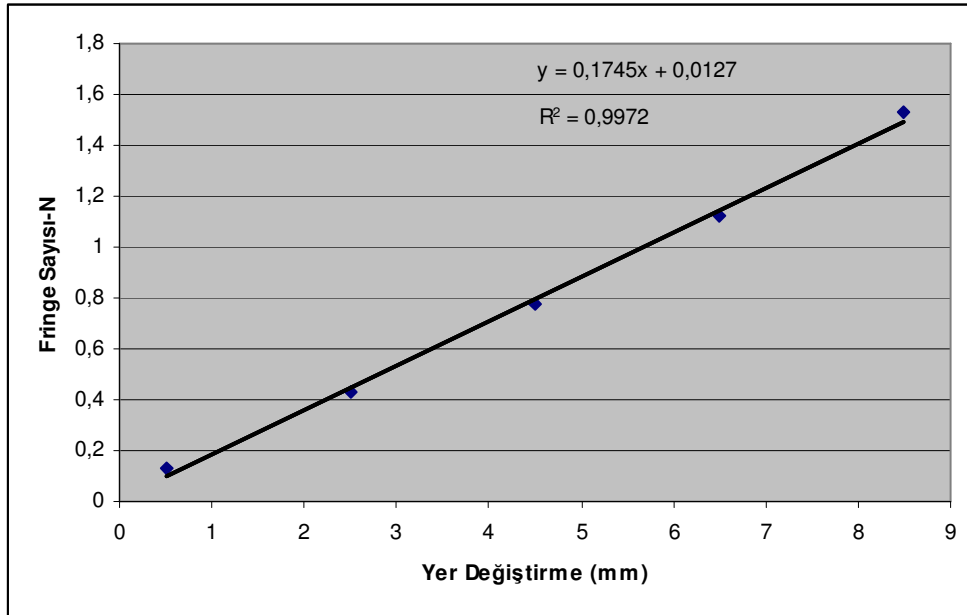
Resim 7.12. Mikrometre 0,5 mm ve Fringe Sayısı 0,13 olduğunda ölçüm noktası üzerinde görünen siyah band

Oluşan bu siyah band Kompensatör kullanılarak ölçüm alınacak nokta üzerine getirilmiştir ve kompensatörden kuvvet çizgi (fringe) sayısı okunmuştur. Bu işlem farklı eğme miktarları için tekrarlanmıştır. Mikrometreden okunan farklı eğme miktarı ile buna karşılık gelen ve kompensatörden okunan kuvvet çizgi sayısı değerleri Çizelge 7.9'da verilmiştir.

Çizelge 7.9. Mikrometre ve kompensatörde okunan değerler

Mikrometrede okunan değer (mm)	Kuvvet çizgi sayısı (f)
0,5	0,13
2,5	0,43
4,5	0,78
6,5	1,12
8,5	1,53

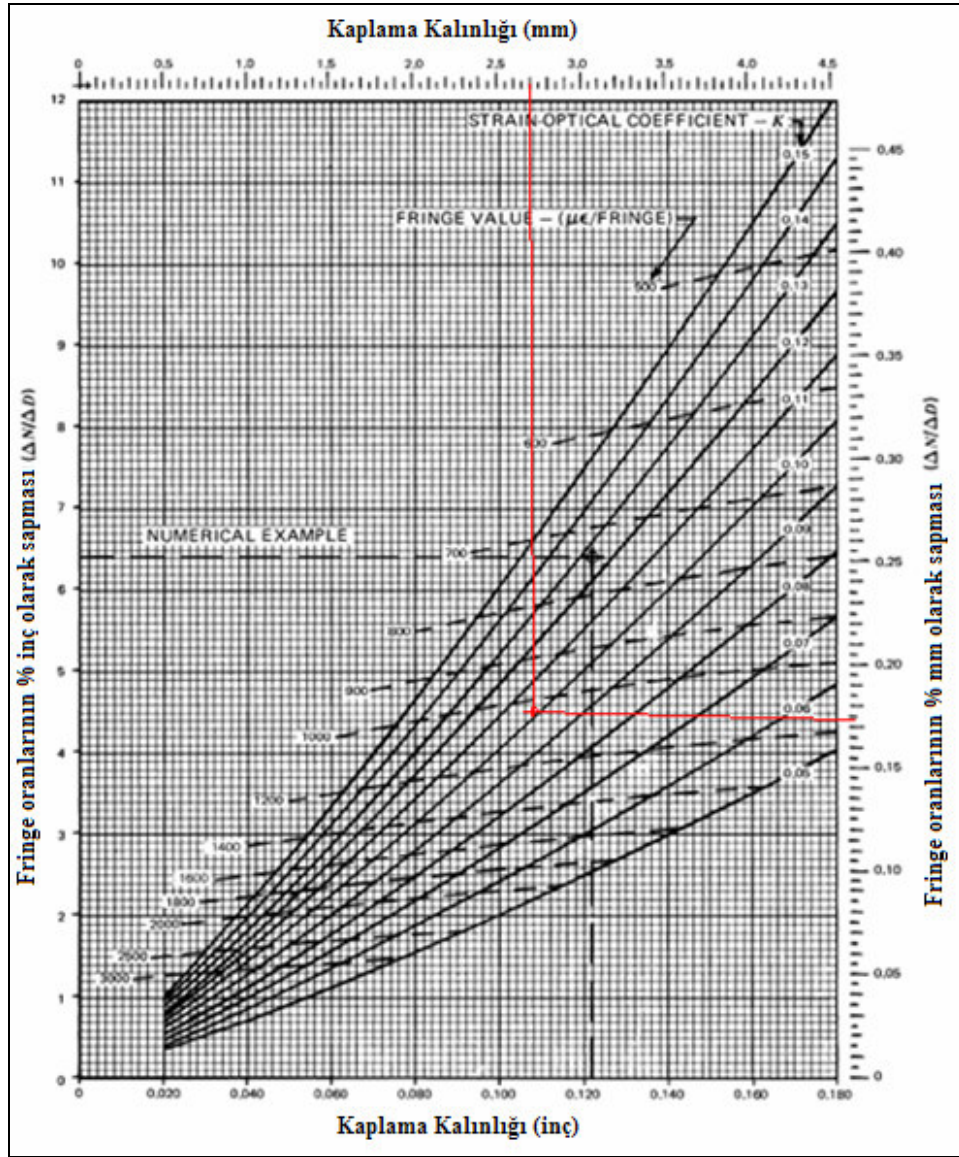
Daha sonra alınan bu ölçümlerin grafiği çizilmiştir ve oluşan doğrunun eğimi 0,174 olarak bulunmuştur (Şekil 7.6).



Şekil 7.6. Kalibrasyon eğrisi

Bulunan eğim Şekil 7.7’de verilen fotoelastik kaplamaların kalibrasyon çizelgesinde milimetre olarak verilen eğim sütununda işaretlenir. Aynı çizelgede kaplama kalınlığı yine milimetre sütununda işaretlenir ve kesişen noktalardan $K=0,102$ ve $f=1045$ değerleri bulunur. Burada bulunan K plastik kaplama malzemesinin gerinim-

optik katsayısını, f ise plastik kaplamanın kuvvet çizgisi oranını vermektedir [42]. Şekil 7.7’de fotoelastisite kaplama malzemesi kalibrasyon çizelgesi görünmektedir.



Şekil 7.7. Fotoelastisite kaplama malzemesi kalibrasyon çizelgesi [42]

Bulunan bu K ve f değerleri “Eş. 7.5”te yerine konularak gerinim farkı bulunabilir [42].

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = N \times f \quad (7.5)$$

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$:Asal gerinimler

N :Kuvvet çizgi sayısı

f :Plastik kaplamanın kalibrasyon oranı

7.3. Fotoelastisite Yöntemi ile Gerilme Analizi

7.3.1. Pilot (ön) testler ve fotoelastisite analizi için çekme levhası uygulaması

Fotoelastisite yöntemi ile yapılması düşünülen deneyler tek ekseninde bir gerilme altında yapılacağından, önce St 37 levha malzemedeki pilot testler ve fotoelastisite analizleri yapılmıştır. 7×50 mm boyutlarındaki çekme levhasına fotoelastisite kaplama malzemesi yapıştırılmış ve çekme testine tabi tutulmuştur (Resim 7.13).



Resim 7.13. Çekme levhasının kaplanmış görüntüsü

Çekme levhasına , 30 kN, 45 kN, 60 kN ve 75 kN'luk yükler uygulanmış ve Fotoelastisite analizi ile gerilim ve gerinim farkları tespit edilmiştir. Her bir yük uygulandığı esnada kompensatörde okunan kuvvet çizgi sayısı Çizelge 7.10'de verilmiştir. Çekme levhasındaki referans bir noktadaki dört ayrı gerilme değeri için analiz yapılmıştır. Programda plastik kaplama malzemesi PL 1, kalınlığı 2,76 mm, analizi yapılacak malzeme çelik seçilerek kalınlığı 7 mm olarak girilmiştir. Analiz programı kalibrasyon değeri f^* yi çıktı olarak vermiştir (Çizelge 7.10).

Çizelge 7.10. Çekme levhası için uygulanan yükler ve kuvvet çizgisi sayıları

Uygulanan (kN)	yük	Levhadaki çekme gerilmesi (N/mm ²)	Kuvvet çizgisi sayısı (f)
30		85,71	0,47
45		128,57	0,75
60		171,42	0,99
75		214,28	1,24

7.3.2. Kaynaklı birleştirmenin fotoelastisite malzemesi ile kaplanması ve analizi

Fotoelastisite yöntemi ile kaynak dikişlerinde oluşan kalıntı gerilmeleri belirleyebilmek için 70×10 mm boyutlarındaki bir lamaya 222 N/mm² öngerilme uygulanmış ve bu gerilme altında 50×10 mm boyutlarındaki diğer bir lama köşe kaynağı ile birleştirilmiştir. Ayrıca öngerilme uygulanarak yapılan köşe kaynak dikişleri ile öngerilme uygulanmadan yapılan kaynak dikişleri arasındaki farkı belirlemek için, farklı lama malzemeler kullanılarak öngerilmesiz durumda kaynak dikişleri çekilmiştir. Öngerilme uygulanarak ve uygulanmadan gerçekleştirilen kaynak dikişlerinin kullanılabilir uzunluğu 70 mm olarak belirlenmiştir. Öngerilmesiz ve öngerilme uygulanarak yapılan kaynak dikişlerinin üzerine fotoelastisite kaplama malzemesi yapıştırılmış ve fotoelastisite yöntemi ile analizleri yapılmıştır. Vishay PALC 3 Photostress programının verdiği gerilme ve gerinim farkları fringe sayısı bilindiği takdirde “Eş 7.5 ve 7.6” kullanılarak hesaplanabilir [43].

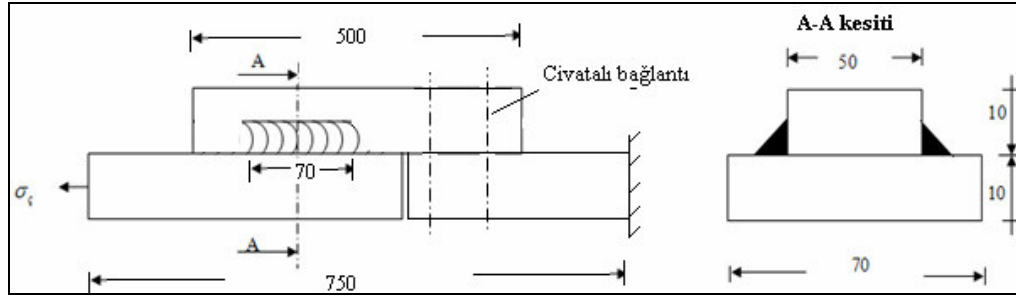
$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{E}{1+\nu} \times (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \quad (7.6)$$

σ_1, σ_2 : Asal gerilmeler

E : Çelik malzeme için elastik modül (207 GPa)

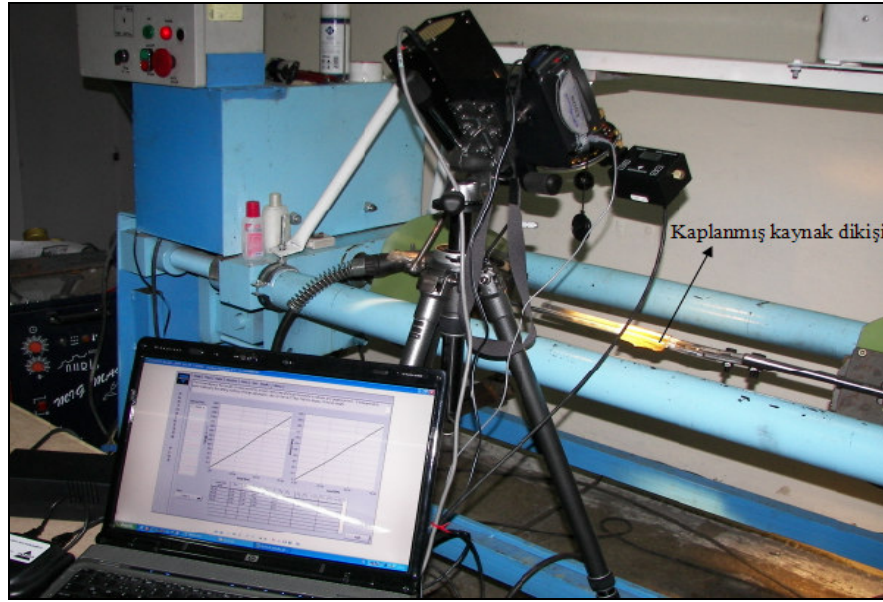
ν : Kaplama malzemesinin poisson oranı (0,29)

7.3.3. Kaynaklı birleştirilmiş çekme levhasında gerilme analizi



Şekil 7.8. Kaynaklı çekme çubuğu

Gerilmesiz durumdaki 70×10 mm kesitine sahip malzemeye yine, gerilmesiz durumda bulunan 50×10 mm kesitindeki malzeme köşe kaynağı ile birleştirilmiştir. Üretilen kaynaklı birleştirilmiş levha yatay çekme cihazına yerleştirilmiş ve sırasıyla çekme yönünde 25 kN, 50 kN ve 75 kN’luk çekme yükleri uygulanmıştır (Şekil 7.8).



Resim 7.14. Kaynaklı birleştirmenin fotoelastik analiz süreci ve deney düzeneği

Uygulanan çekme yüklerine bağlı olarak kaynak dikişinde tek eksenli oluşan gerinim ve gerilme farkları fotoelastisite analizi ile ölçülmüştür (Resim 7.14).

Çizelge 7.11. Öngerilmesiz kaynak dikişine uygulanan yükler ve kuvvet çizgisi sayıları

Uygulanan yük (kN)	Kuvvet çizgisi sayısı
25	0,33
50	0,61
75	0,93

Öngerilme uygulanmadan yapılan kaynak dikişine 25 kN, 50 kN ve 75 kN yükler ile çekilmiş ve bu esnada her bir yük altında kaynak dikişinde oluşan gerilme ve gerinimler fotoelastisite cihazı ile ölçülmüştür. Uygulanan her yüke karşılık belirlenen kuvvet çizgi sayıları cihaz tarafından atanmıştır (Çizelge 7.11).

7.3.4. Öngerilmeli birleştirmelerdeki kaynak dikişlerinin gerilme analizi

Fotoelastisite yöntemi ile kaynak dikişlerinde oluşan kalıntı gerilmeleri belirleyebilmek için 70Hata! Düzenleme alan kodlarından nesneler oluşturulamaz.10 mm boyutlarındaki lamaya 222 N/mm² öngerilme uygulanmış ve bu gerilme altında 50Hata! Düzenleme alan kodlarından nesneler oluşturulamaz.10 mm boyutlarındaki lama köşe kaynağı ile birleştirilmiştir. Kaynaklı birleştirme nedeniyle parçalarda meydana gelen sıcaklığın oda sıcaklığına düşmesi için beklenmiş ve dikişlerin üzerine fotoelastik kaplama malzemesi yapıştırılmıştır. Bu durumda birleştirilen malzemeler öngerilme altında olmasına karşın, öngerilmeyi oluşturabilmek için 70×10 mm boyutlarındaki lamaya uygulanan yük kademeli olarak bırakılmış ve fotoelastik kaplama üzerinde farklı öngerilmeler oluşturulmuştur.

Çizelge 7.12. Öngerilmeli kaynak dikişinde uygulanan yük ve kuvvet çizgisi sayıları

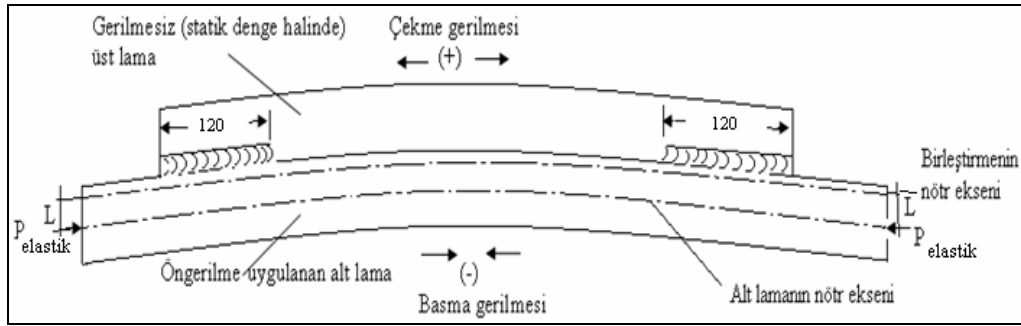
Uygulanan yük (kN)	Kuvvet çizgisi sayısı
51,8	0,25
103,6	0,51
155,4	0,75

Öngerilmeli kaynak dikişinin fotoelastik analizi sırasında, öngerilme kademeli olarak serbest bırakılmış 51,8 kN, 103,6 kN ve 155,4 kN yükler altında kaynak dikişindeki kalıntı gerilmeler fotoelastisite cihazı ile ölçülmüş ve bu yükler altındaki gerinim ve gerilme farkı belirlenmiştir. Her bir yük sırasındaki kuvvet çizgisi sayıları Çizelge 7.12’de verilmiştir.

8. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

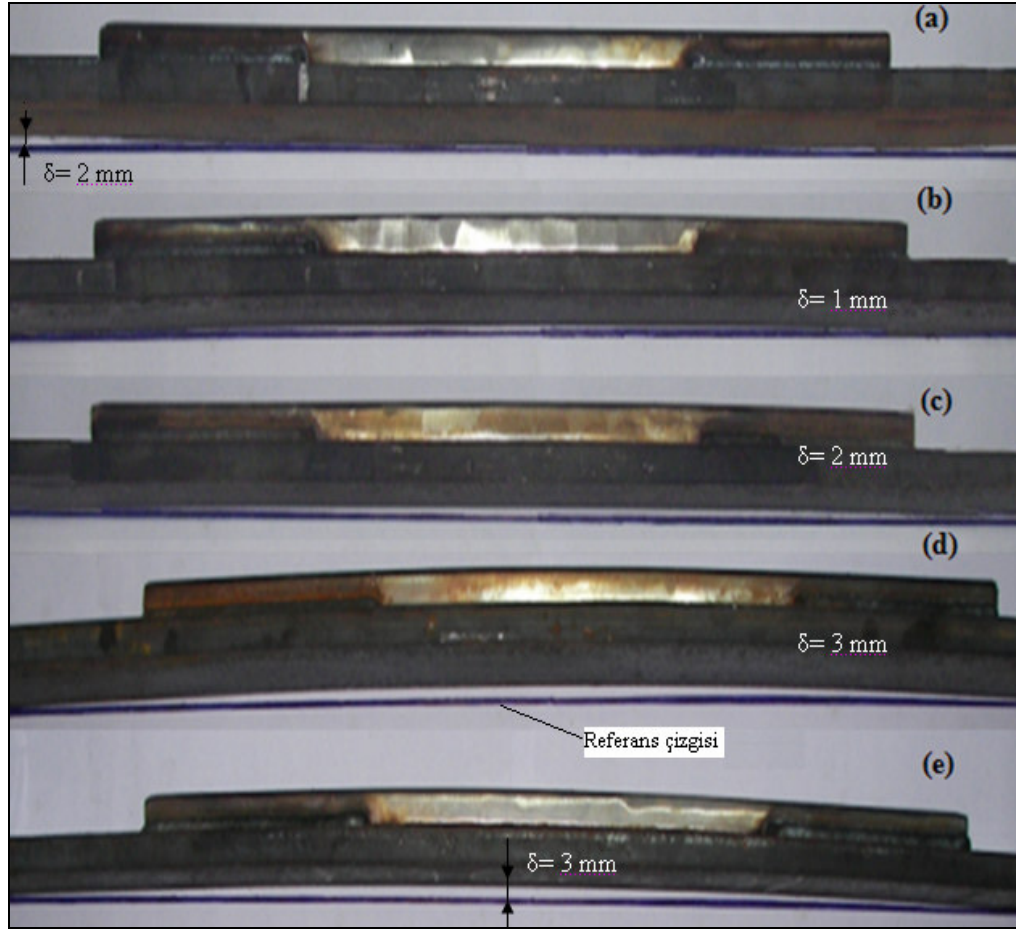
8.1. İkiz Numunelerde Öngerilmeye Bağlı Oluşan Sehimler

Elastik sınırlar içinde uygulanan öngerilmenin etkisiyle aksenal elastik uzama gösteren alt lama, üst lamaya kaynakla birleştirildikten sonra öngerilme kaldırıldığında alt lama birleştirmeye elastik basma kuvveti (P_{elastik}) uygular. Birleştirmeye basma gerilmesi uygulayan alt lamanın nötr eksenini ile birleştirmenin nötr eksenini arasındaki mesafe ise moment kolu (L) gibi davranır. Bu durumda öngerilmeli olarak kaynaklı birleştirilen konstrüksiyonda ters sehim (δ) oluşur (Şekil 8.1).



Şekil 8.1. İkiz numunede kaynaklı birleştirme ile meydana gelen ters sehimin şematik gösterimi

İkiz numunelerin kaynaklı birleştirme işleminden sonra, Resim 8.1-a'da görüldüğü gibi öngerilmesiz levhalarda, kaynak dikişinin sistemin nötr ekseninin üzerinde olmasından dolayı düz sehim meydana gelmiştir. Öngerilmeli numunelerde ise, alt lamanın oluşturduğu basma kuvveti etkisiyle, öngerilmesiz olarak üretilen malzemelerde oluşan sehimin yönüne ters sehimler oluşmuştur. Öngerilmeli malzemeler kendi aralarında kıyaslanacak olursa, artan öngerilme miktarı ile daha fazla ters sehim elde edilmiştir. Bu durum, Resim 8.1'de referans çizgileri ile alt lamanın alt kenarı arasında kalan boşluktan anlaşılmaktadır.



Resim 8.1. Öngerilmelerin serbest bırakılması sonucu ikiz numunelerde oluşan sehimler; a) ÖG-0, b) ÖG-91, c) ÖG-148, d) ÖG-194, e) ÖG-222

8.2. Çekme/Makaslama Testi Sonuçları

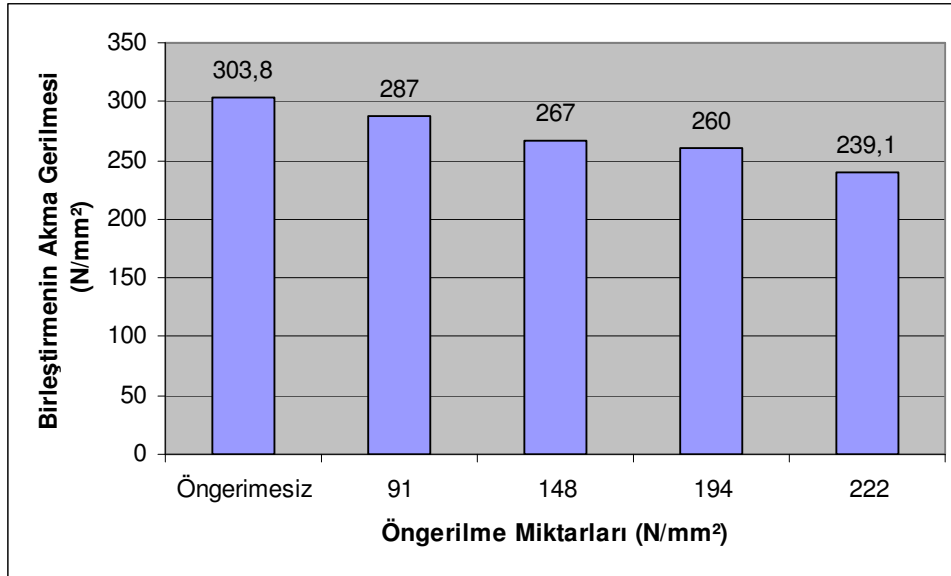
Yapılan çekme/makaslama testleri ile farklı öngerilmeler uygulanarak üretilen ve öngerilmeksiz birleştirmelerde numunelerde oluşan kalıntı gerilmelerin, birleştirmenin mekanik özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Çekme/makaslama testi sonucunda elde edilen değerler Çizelge 8.1’de verilmiştir.

Çizelge 8.1. Öngerilmeli ve öngerilmesiz birleştirmelerin mekanik özellikleri

Uygulanan Yük (N)	Uygulanan Öngerilme (N/mm ²)	Birleştirmenin Akma Gerilmesi (N/mm ²)	Akma Noktasındaki % Uzama Miktarı
0	0	303,8	2,3
63700	91	287	2,2
103600	148	267	2,1
135800	194	260	1,9
155400	222	239,1	1,2

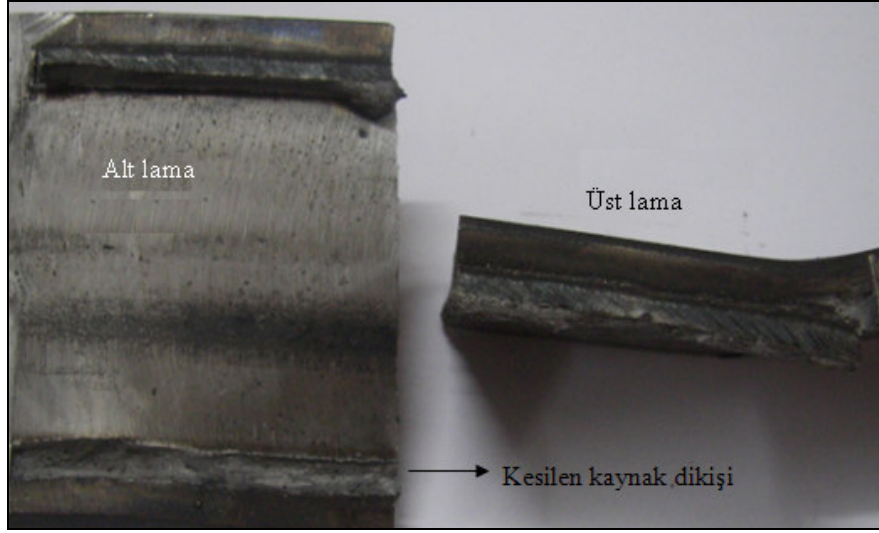
Çizelge 8.1’de görüldüğü gibi kaynak dikişinde oluşan makaslama etkisi akma gerilmesi açısından, mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilemiştir.

Çizelge 8.1’de verilen ve çekme testi ile elde edilen sonuçlara göre, artan öngerilme miktarına bağlı olarak kaynak dikişlerinin akma dayanımlarında ve akma noktasındaki % uzama miktarlarında azalma olduğu görülmüştür. Bu azalmalara, dikişlerde oluşturulan kalıntı gerilmelerin makaslama gerilmesi olarak etkimesi ve öngerilmelerin serbest bırakılmasıyla ilk haline dönmek isteyen alt lamanın, üst lama tarafından engellenmesi ile kaynak dikişlerinin alt bölgesinde çekme kalıntı gerilmeleri oluşmasının neden olduğu düşünülmektedir. Bundan dolayı, çekme deneylerinde, numunelere uygulanan çekme kuvvetlerinin kaynak dikişlerinde var olan makaslama gerilmelerini (dikişin alt bölgesindeki çekme kalıntı gerilmeleri) arttırmasından dolayı birleştirmenin akma gerilmelerini ve akma noktasındaki % uzama miktarlarını azalmasına neden olduğu düşünülmektedir. Farklı öngerilme yüklerine bağlı olarak kaynak dikişlerinin akma dayanımındaki azalma grafiği Şekil 8.2’de verilmiştir.

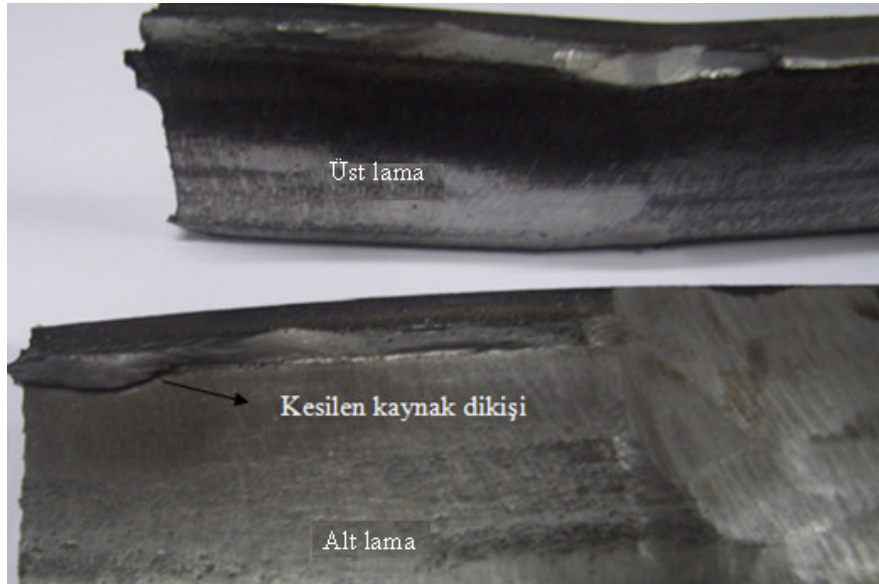


Şekil 8.2. Birleştirmeye uygulanan farklı öngerilmelerin birleştirmenin akma gerilmesine etkisi

Öngerilme uygulanmadan köşe kaynak dikişleri çekilerek üretilen numunelerin akma dayanımı 303,8 N/mm² olarak ölçülmüştür. Lama malzemelerin akma dayanımları ise 304,6 N/mm²'dir. Kaynak telinin (dolgu malzemesi) akma dayanımı ise minimum 420 N/mm² olarak belirtilmiştir [36]. Tüm bu değerler göz önüne alındığında kaynak metalinin akma dayanımının lama malzemelerin akma dayanımından daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Öngerilmesiz durumda köşe kaynak dikişleri çekilen numunelerin akma dayanımları dikkate alındığında, lama malzemenin akma dayanımına çok yakın bir değer olduğu görülmektedir. Dolayısıyla çekme/makaslama testi sırasında akmanın kaynak metalinde olmayıp, ana metalde meydana geldiği söylenebilir. Çekme/makaslama testleri sonrası yapılan makro incelemede kopmaların ana metal ile dolgu metali arasındaki (ITAB) bölgede gerçekleştiği tespit edilmiştir (Resim 8.2, 8.3, 8.4, 8.5, 8.6). Ancak uygulanan öngerilmenin kaynak dikişlerinde oluşturduğu kalıcı makaslama gerilmesinden dolayı, artan öngerilme ile birlikte birleştirmedeki kalıcı makaslama gerilmesi de artmış ve dolayısı ile birleştirmenin daha düşük gerilmelerde akmaya (plastik deformasyona) başladığı söylenebilir (Şekil 8.2).



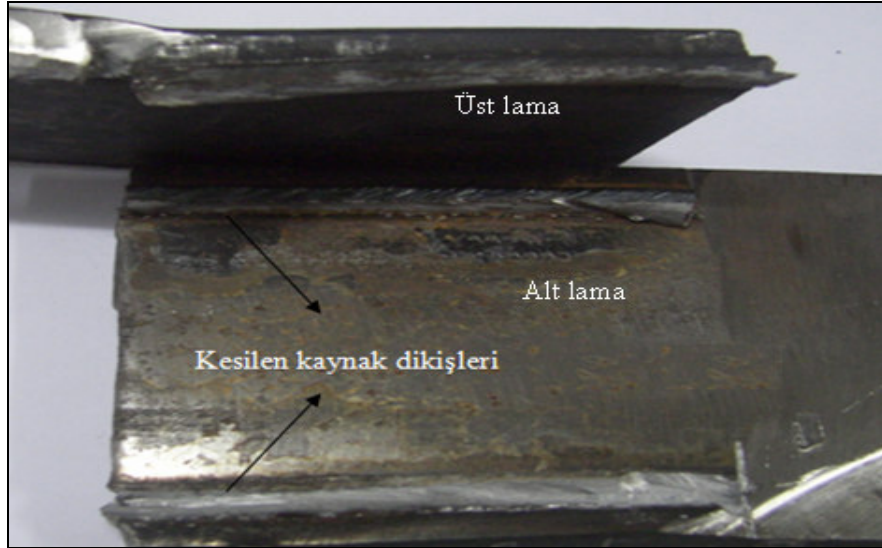
Resim 8.2. Öngerilmesiz numunenin çekme/makaslama testi sonrası kaynak dikişlerinin ve kopma bölgelerinin görüntüsü



Resim 8.3. 91 N/mm² öngerilme uygulanan numunenin çekme/makaslama testi sonrası kaynak dikişlerinin ve kopma bölgelerinin görüntüsü



Resim 8.4. 148 N/mm² öngerilme uygulanan numunenin çekme/makaslama testi sonrası kaynak dikişlerinin ve kopma bölgelerinin görüntüsü

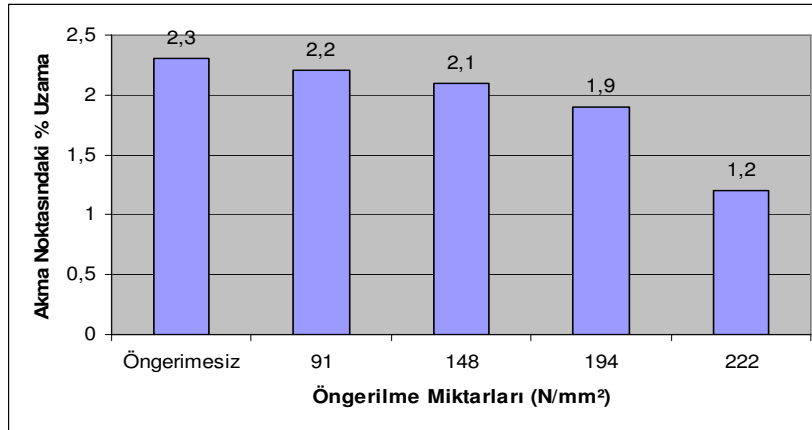


Resim 8.5. 194 N/mm² öngerilme uygulanan numunenin çekme/makaslama testi sonrası kaynak dikişlerinin ve kopma bölgelerinin görüntüsü



Resim 8.6. 222 N/mm² öngerilme uygulanan numunenin çekme/makaslama testi sonrası kaynak dikişlerinin ve kopma bölgelerinin görüntüsü

Çekme/makaslama testi verilerine göre, uygulanan farklı öngerilme miktarlarının, kaynaklı birleştirmenin akma noktasındaki % uzamasına da etki ettiği belirlenmiştir. Şekil 8.3'teki veriler göz önüne alındığında artan kalıcı gerilme miktarı ile birlikte kaynaklı birleştirmelerin % uzama miktarlarında azalma olduğu anlaşılmaktadır. % uzamalardaki bu azalmalara sebep olarak, kaynaklı birleştirmelerde oluşan kalıcı gerilmelerin kaynak dikişinin akma gerilmesindeki (akma noktası) azalmaya bağlanabilir.



Şekil 8.3. Kaynaklı birleştirmeye uygulanan farklı öngerilmeler ile akma noktasına kadar % uzama miktarları arasındaki ilişki

8.3. Ön Test Çekme Levhasında Gerilme Analizi Sonuçları

Fotoelastisite yöntemi ilk olarak 7×50 mm boyutlarındaki düz levha malzemeye uygulanmıştır. Bunun için Resim 8.7’de görüldüğü gibi 7 mm kalınlığındaki çekme levhasına kaplama malzemesi yapıştırılmıştır. Daha sonra levha malzemeye 30 kN, 45 kN, 60 kN, 75 kN’luk çekme yükleri uygulanmış ve çekme levhasında değişik eksenel çekme gerilmeleri oluşturulmuştur (Resim 8.7). Uygulanan bu gerilmelerin oluşturduğu gerinim ve gerilim farkları Fotoelastisite analizi ile belirlenmiş ve sonuçlar Çizelge 8.2’de verilmiştir.



Resim 8.7. Çekme yükü uygulandığında çekme levhasında tüm yüzey boyunca oluşan siyah band

Çizelge 8.2. Çekme levhasının fotoelastik analiz sonuçları

Uygulanan yük (kN)	Kuvvet çizgisi sayısı	$\varepsilon_1 - \varepsilon_2$	$\sigma_1 - \sigma_2$ (N/mm ²)
30	0,47	494	80
45	0,75	788	127
60	0,99	1040	167
75	1,24	1303	210

“Eş 7.5 ve 7.6” kullanılarak, 30 kN yük uygulanması sonucu oluşan gerinim ve gerilme farkları;

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = 0,47 \times 1045 = 491,15$$

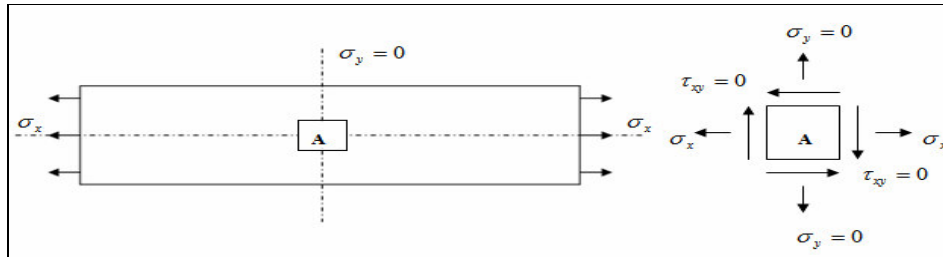
$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{207 \times 10^3}{1 + 0,29} \times (491,15 \times 10^{-6}) = 78,79 \text{ MPa} \text{ olarak hesaplanabilir.}$$

Teorik olarak hesaplanan sonuçlar ile Fotoelastisite analizi sonuçları karşılaştırıldığında, ortalama % 1 sapma ile birbirine yakın değerler olduğu görülmektedir. Çizelge 8.3’de levha malzeme için teorik olarak hesaplanan ve fotoelastisite cihazı ile ölçülen değerler karşılaştırılmıştır.

Çizelge 8.3. Uygulanan çekme yüküne göre fotoelastisite teorisine göre hesaplanan ve Fotoelastisite ile ölçülen gerinim ve gerilme farkları

Uygulanan yük (kN)	Fotoelastisite teorisine göre hesaplama sonuçları		Fotoelastisite cihazı sonuçları	
	$\varepsilon_1 - \varepsilon_2$	$\sigma_1 - \sigma_2$ (N/mm ²)	$\varepsilon_1 - \varepsilon_2$	$\sigma_1 - \sigma_2$ (N/mm ²)
30	491,15	78,8	494	80
45	783,75	125,7	788	127
60	1034,5	166	1040	167
75	1295,8	207,9	1303	210

Fotoelastisite analizi ile bulunan $\sigma_1 - \sigma_2$ ve $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$ farklarından Mohr dairesi kullanılarak σ_1, σ_2 ve $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ değerleri bulunabilir. Levha malzeme tek ekseninde çekme gerilmesine maruz kaldığı için sadece “x” ekseninde gerilme oluşur dolayısıyla “y” ekseninde herhangi bir gerilme meydana gelmez (Şekil 8.4). Bu nedenle $\sigma_y = 0$ ’dır.



Şekil 8.4. Çekme levhasında gerilme durumu

Vishay PALC 3 Photostress programının verdiği $\sigma_1 - \sigma_2$ gerilme farkındaki $\sigma_1 = \sigma_{\max}$ ve $\sigma_2 = \sigma_{\min}$ 'dir.

$$\sigma_{\max} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + (\tau_{xy})^2\right)} \quad (8.1)$$

$\sigma_y = 0$ ve $\tau_{xy} = 0$ olduğundan

$$\sigma_{\max} = \frac{\sigma_x}{2} + \frac{\sigma_x}{2}$$

$\sigma_{\max} = \sigma_x = \sigma_1$ 'dir [42].

$$\sigma_{\min} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + (\tau_{xy})^2\right)} \quad (8.2)$$

$\sigma_y = 0$ ve $\tau_{xy} = 0$ olduğundan;

$$\sigma_{\min} = \frac{\sigma_x}{2} - \frac{\sigma_x}{2}$$

$\sigma_{\min} = 0$, σ_2 'dir [44].

Uygulanan yük ve çekme levhasının malzemenin alanı bilindiği için sistemdeki gerilme hesaplanabilir. Levha malzemenin kesit alanı 350 mm²'dir. 30 kN kuvvet uygulandığından sistemde oluşan maksimum gerilme ($\sigma_{\max}$) aşağıdaki şekilde hesaplanabilir [44].

$$\sigma_{\max} = \sigma_x = \sigma_1 = \frac{P}{A_{levha}} \quad (8.3)$$

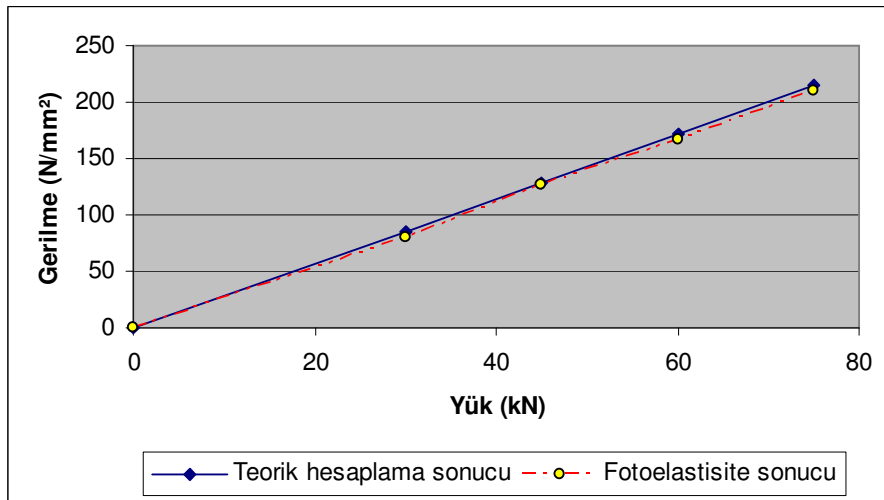
$$\sigma_1 = \frac{30000N}{350mm^2} = 85,71N/mm^2$$

Bu şekilde uygulanan tüm yükler için $\sigma_{\max}$ teorik olarak hesaplanabilir ve Çizelge 8.4'teki veriler elde edilir.

Çizelge 8.4. Klasik gerilme analiz teorisine göre hesaplanan ve fotoelastisite analizi ile sonuçların karşılaştırılması

Uygulanan yük (kN)	Teorik hesaplama (σ_1), N/mm ²	Fotoelastisite sonuçları ($\sigma_1 - \sigma_2$) = σ_1 , N/mm ²
30	85,71	80
45	128,57	127
60	171,42	167
75	214,28	210

Çizelge 8.4'teki veriler kullanılarak Yük-Gerilme grafiği çizildiğinde bulunan değerlerin ortalama % 3 sapma ile birbirine yakın ve lineer bir şekilde arttığı görülmektedir (Şekil 8.5).

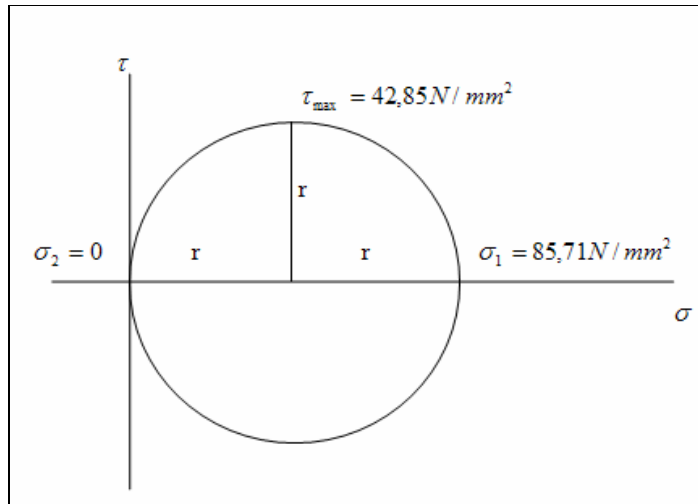


Şekil 8.5. Çekme levhasının teorik ve fotoelastisite gerilme analiz sonuçları

σ_1 ve σ_2 asal gerilmelerine 45° açıda meydana gelen maksimum kesme gerilmesinin Mohr dairesinde belirlenebilmesi için σ_x gerilme eksenine 90° açısı yapan nokta alınır [44]. Bu nokta maksimum kesme gerilmesine ($\tau_{\max}$) karşılık gelen noktadır ve Mohr dairesinin yarıçapına (r) eşittir (Şekil 8.6).

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_{\max}}{2} \quad (8.4)$$

$$\tau_{\max} = \frac{85,71 \text{ N/mm}^2}{2} = 42,85 \text{ N/mm}^2$$



Şekil 8.6. 30 kN yük altındaki gerilmelerin Mohr Dairesi ile bulunması

8.4. Kaynaklı Birleştirilmiş Çekme Lamasında Gerilme Analizi Sonuçları

Çizelge 8.5. Öngerilmesiz kaynaklı lamanın fotoelastisite sonuçları

Uygulanan yük (kN)	Kuvvet çizgisi sayısı	$\epsilon_1 - \epsilon_2$	$\sigma_1 - \sigma_2$ (N/mm ²)
25	0,33	356	57
50	0,61	659	106
75	0,93	1004	162

Levhalara uygulanan çekme gerilmesinin kaynak dikişinde oluşturduğu tek eksenli gerilme hali nedeniyle, dikişler üzerinde çekme yönünde σ_x gerilmesi oluşur ($\sigma_x = \sigma_{\max} = \sigma_1$, “Eş 8.1”). Çekme gerilmesine dik yön olan “y” yönünde ise $\sigma_y = 0$ ’dır ($\sigma_y = \sigma_{\min} = \sigma_2$, “Eş 8.2.”). Dolayısıyla $\tau_{xy} = 0$, $\tau_{\max} = \sigma_x / 2$ ’dir (“Eş 8.4”). Uygulanan yüklerin kaynak dikişinin kesit alanına bölünmesiyle kaynak dikişinde oluşacak “ σ_x ” gerilmeleri teorik olarak hesaplanabilir (“Eş 8.3”).

L = Kaynak dikiş uzunluğu (70 mm)

a = Kaynak kalınlığı (3,4 mm)

A = Kaynak alanı ($2 \times 3,4 \times 70 = 476 \text{ mm}^2$)

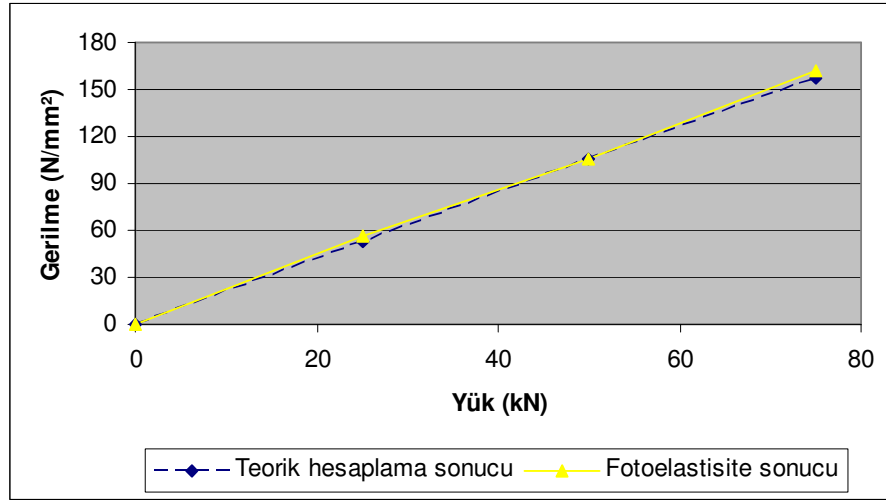
Çizelge 8.6. Öngerilmesiz kaynaklı çekme lamasında kaynak dikişlerinde oluşması muhtemel gerilmeler ve fotoelastisite sonuçları

Uygulanan yük (kN)	Teorik hesaplama σ_1 (N/mm ²)	Fotoelastisite sonuçları $\sigma_1 - \sigma_2$ (N/mm ²)	Hesaplanan $\tau_{\max}$ (N/mm ²)
25	52,52	57	26.3
50	105,04	106	52.5
75	157,56	162	78.7

Uygulanan her yük için σ_x ve $\sigma_y = 0$ gerilmeleri “Eş 8.1, 8.2 ve 8.3” ile hesaplanabildiği için, “Eş 8.4” kullanılarak $\tau_{\max}$ ’da hesaplanabilir.

Mohr dairesi kullanılarak istenilen açıda oluşan gerilmeler hesaplanabilir. Şekil 8.7’de ise fotoelastisite analizi ile bulunan gerilme farkları ile teorik olarak hesaplanan gerilme farklarının uygulanan yüke göre değişimini veren grafik görülmektedir. Grafikten de anlaşılabacağı üzere tek eksenli gerilme hali için Vishay PALC 3 Photostress programının verdiği gerilme farkı sonuçları ile teorik olarak

hesaplanan sonuçlar birbirine oldukça yakındır ve artan yüke bağlı olarak liner artmaktadır.



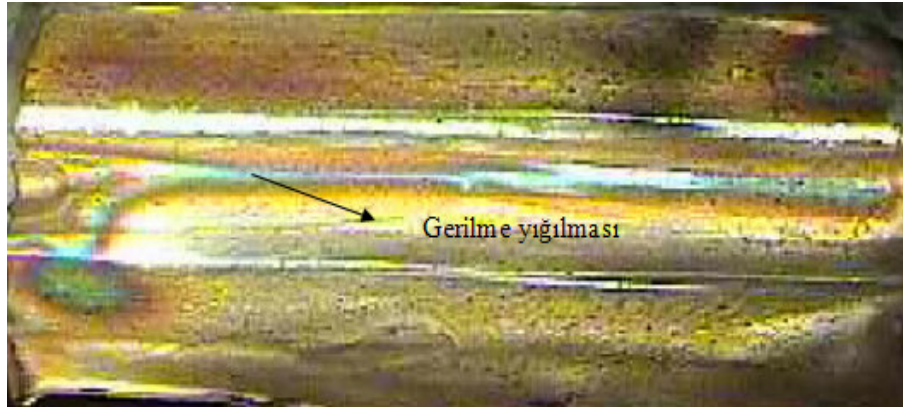
Şekil 8.7. Öngerilmemiş kaynaklı lamada kaynak dikişlerinde oluşması muhtemel gerilmeler ve fotoelastisite sonuçları grafiği



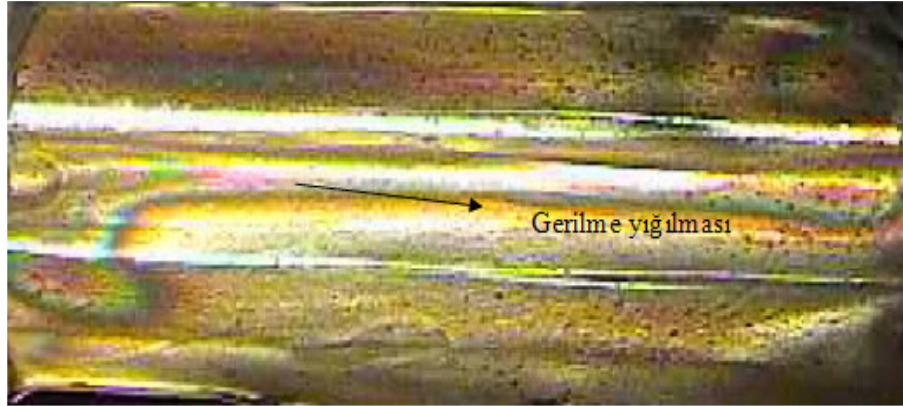
Resim 8.8. 25 kN'luk yük uygulandığında kaynak dikişinde oluşan gerilme dağılımı

Kaynaklı çekme lamasının fotoelastisite analizi sırasında, kaynak dikişi üzerinde oluşan gerilme dağılımı Resim 8.8, 8.9 ve 8.10'da görülmektedir. Gerilmenin başlangıcı kaynak dikişi ucunda meydana gelmiştir. Bunun nedeni çekme/makaslama testi sırasında, uygulanan yüke bağlı olarak kaynak dikişinde oluşan makaslama gerilmesinin ilk önce kaynak dikiş ucunda başlaması ve yığılmasından kaynaklanmaktadır. Makaslama gerilmesinin kaynak dikişinin üst kısmında oluşması ve uygulanan yük ile artması, fotoelastisite kaplama malzemesi üzerinde renkli

bölgelerin (mavi, sarı, kırmızı, yeşil v.b.) oluşmasına neden olmuştur (Resim 8.9). Kaynak dikiş ucunda uygulanan yüke bağlı olarak oluşan makaslama gerilmesinin, kaynak dikişinin üst lama kısmında başladığı ve artan yük ile birlikte yine bu bölgede yığılarak arttığı görülmüştür. Kaynak dikişi ucunda başlayan ve artan yük ile oluşan bu renkli bölgeler, yükün arttırılması ile kaynak dikişi üzerine yayılmaktadır (Resim 8.10).



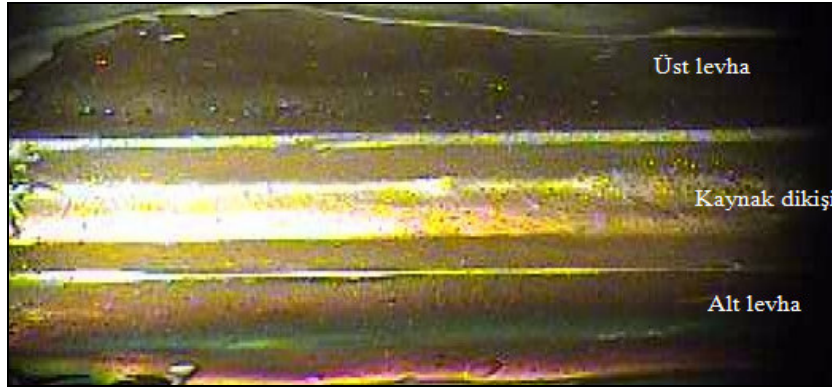
Resim 8.9. 50 kN'luk yük uygulandığında kaynak dikişinde oluşan gerilme dağılımı



Resim 8.10. 75 kN'luk yük uygulandığında kaynak dikişinde oluşan gerilme dağılımı

8.5.Öngerilmeli Birleştirmelerdeki Gerilme Analiz Sonuçları

Öngerilmeli birleştirmelere uygulanan 51,8 kN, 103,6 kN ve 155,4 kN'luk eksenel çekme yüklerinin kaynaklı birleştirmeden sonra serbest bırakılmasıyla oluşan kalıcı gerilmelerin kaynak dikişinde oluşturduğu gerilmeler fotoelastisite analizi ile ölçülmüştür. Resim 8.11'de öngerilme uygulanmış birleştirmenin fotoelastik kaplanmış hali görülmektedir.

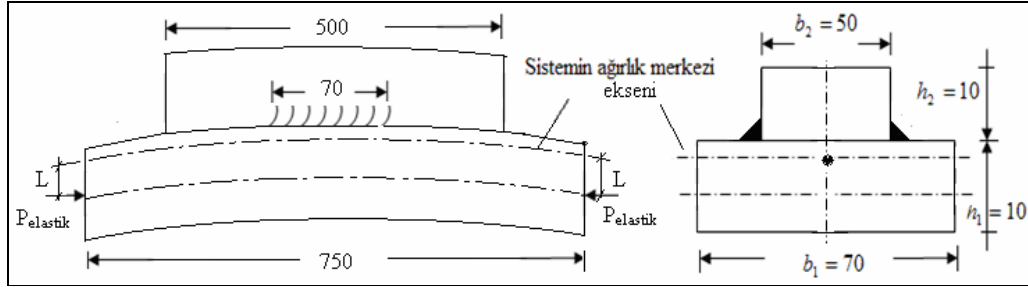


Resim 8.11. Öngerilmeli kaynak dikişinin fotoelastik kaplama malzemesi ile kaplanmış görüntüsü

Alt lamada mevcut çekme gerilmesi (çekme kuvveti), kaynaklı birleştirme tamamlandıktan sonra serbest bırakıldığında, kaynak dikişi vasıtasıyla özellikle üst lamanın alt kısmına kalıcı basma gerilmesi uygular. Alt lamanın ağırlık merkezi eksenini boyunca eksenel basma yükü şeklinde üst lama altına, kaynak dikişine etkileyen bu yük aynı zamanda birleştirmeye bir moment uygular. Çünkü, bu yükün etki yaptığı ağırlık merkezinin üzerinde ve “L” mesafesinde kaynaklı birleştirmenin yeni oluşan ağırlık merkezi mevcuttur. Bu durumda, kaynak öncesi alt lamadaki eksenel çekme kuvveti, serbest bırakıldığında birleştirmenin ağırlık merkezinin altından, birleştirmeye basma kuvveti uygular. Bu durum ise birleştirmede ters sehim meydana getirir.

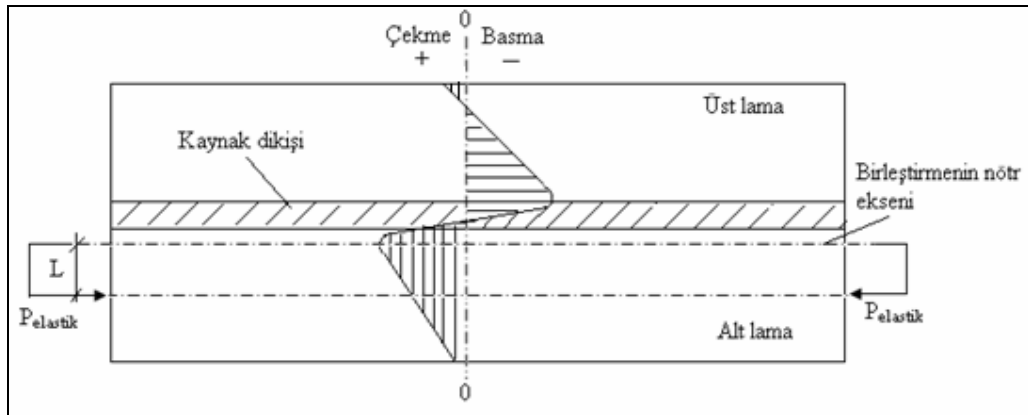
Alt lamadaki mevcut öngerilme kaynak dikişi üzerinde tek eksenli gerilme hali oluşturur. Alt lamanın ağırlık merkezi yatay eksenini boyunca birleştirmeye basma

yükü uygular. Alt lama ağırlık merkezi ile birleştirmenin ağırlık merkezleri arasındaki “L” mesafesi sebebiyle birleştirmede moment etkisi oluşur (Şekil 8.8).



Şekil 8.8. Alt lamadaki öngerilme serbest bırakıldıktan sonra birleştirmede meydana gelen moment etkisi

Birleştirmede meydana gelen ters sehime rağmen alt lamada var olan kalıcı gerilme halen çekme kalıcı gerilmesidir. Çünkü, alt lamada mevcut elastik çekme gerilmesi henüz geri dönememiştir ve kaynak dikişi vasıtasıyla üst lama buna engel olmaktadır. Bu durumda, alt lamadaki mevcut çekme gerilmesi üst lamayı basmaya, üst lama ise bu basma gerilmesine direnç göstererek alt lamadaki kalıcı çekme gerilmesine sebep olmaktadır. Her iki ve ters yönlü gerilmeleri birleştirmedeki bu elemanlara aktaran ise kaynak dikişidir. Bu durumda kaynak dikiş ise kalıcı makaslama gerilmesine maruz kalmaktadır (Şekil 8.9).



Şekil 8.9. Öngerilmeli kaynaklı birleştirmede kalıcı gerilmelerin dağılımı

Çekme çenelerindeki öngerilme yükü tamamen boşatıldıktan sonra kaynaklı birleştirmede var olan bu kalıntı gerilmelerin oluşturduğu eksenel (tek doğrultulu) kalıntı gerilmeler fotoelastisite yöntemi ile ölçülebilir. Ancak, Şekil 8.9’da verilen kalıcı gerilmelerin türü ve dağılımı tahmini olarak belirtilmiştir. Bu gerilmelerin türü delik delme yöntemiyle belirlenebilir.

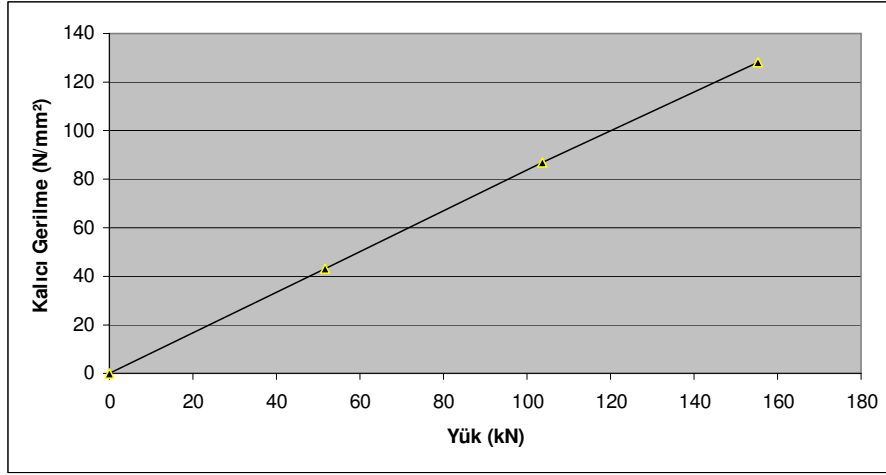
Çekme levhası ve kaynaklı birleştirilmiş çekme lamalarındaki gerilmeler fotoelastisite ile ölçülmüş ve ölçülen değerler doğruluğu analitik yöntemle de teyit edilmiştir. Ancak bu levhalarda uygulanan gerilmeler eksenel çekme gerilmeleriydi ve kalıcı (kalıntı) gerilme değildi. Bu sebeple analitik ve fotoelastisite ile gerilmeleri belirlemek basitti. Bu deneyler sürecindeki fotoelastik gerilme ölçümünde sağlanan tecrübeler kullanılarak, öngerilmeli kaynaklı birleştirmenin fotoelastisite analizi yapılmış ve kalıcı gerilmelerin doğrultusu ve şiddeti belirlenmiştir. Zira, bu birleştirmedeki mevcut kalıcı gerilmeler analitik yaklaşımla belirlenecek kadar basit değildirler.

Çizelge 8.7’de uygulanan öngerilme yükleri için kaynak dikişinde fotoelastisite ile ölçülen fringe sayısı, gerinim ve gerilme farkları verilmiştir.

Çizelge 8.7. Öngerilmeli kaynaklı birleştirmelerin fotoelastik analiz sonuçları

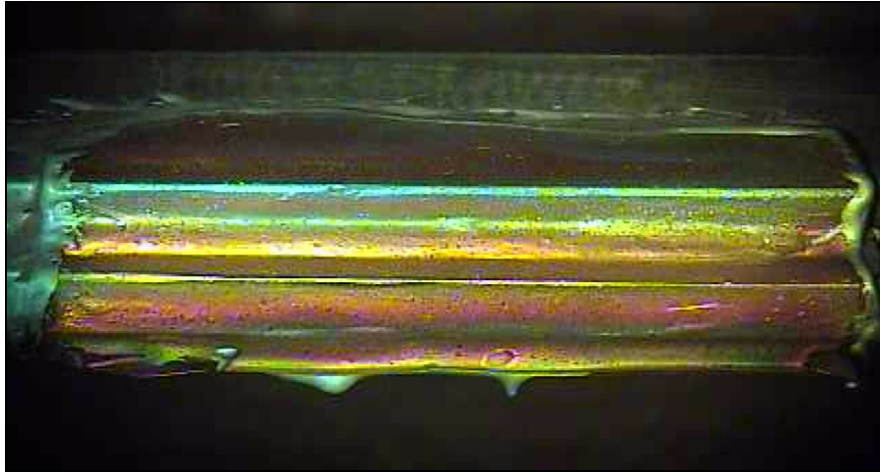
Uygulanan yük (kN)	Kuvvet çizgisi sayısı	$\epsilon_1 - \epsilon_2$	$\sigma_1 - \sigma_2$, (N/mm ²)
51,8	0,25	264	43
103,6	0,51	539	87
155,4	0,75	793	128

Çizelge 8.7 ve Şekil 8.10’dan görüldüğü gibi alt lamaya uygulanmış olan öngerilme yükleri kaynak işlemi sırasında serbest bırakıldıkça en büyük eksenel gerilme farkı kaynak dikişinde oluşmuştur. Öngerilme yükündeki artışa bağlı olarak ve lineer ilişki içinde kaynak dikişindeki kalıcı gerilmede artmıştır.



Şekil 8.10. Öngerilme yüküne göre kaynak dikişinde meydana gelen kalıcı gerilmeler

Şekil 8.9'daki öngerilmeli birleştirme, gösterilen kalıcı gerilme dağılımını doğrular şeklindedir. Fotoelastisite analizinde kaynak dikişinin üst yarısında ve dikiş boyunca yayılan gerilme bandı (siyah band) Resim 7.12'te gösterilmiştir.



Resim 7.12. 155,4 kN yükü maksimum öngerilme oluşturulduğunda kaynak dikişinde meydana gelen fotoelastik görüntüsü

Bu durumda, kaynak dikişinin üst yarısı dikişin boyuna eksenine paralel aksinel basma kalıcı gerilmesine maruzdur. Dikişin alt yarısının ise zıt yönlü ve işaretli olan aksinel çekme kalıcı gerilmesine maruz kaldığı söylenebilir. O halde alt lamaya uygulanan ön gerilme ile üretilen bu kaynaklı birleştirmede kaynak dikişi makaslama

gerilmesine maruzdur. Bu durumda kaynak dikişinde var olan makaslama kalıcı gerilmesinin, çekme/makaslama deneylerinde birleştirmenin mekanik özelliklerini düşürmesi muhtemeldir.

9. SONUÇLAR

Yapılan bu yüksek lisans çalışması ile kaynaklı birleştirmelerde oluşan kalıntı gerilmelerin birleştirmenin mekanik özelliklerine etkileri deneysel ve teorik olarak kıyaslamalı şekilde araştırılmıştır. Araştırma sonucu elde edilen genel sonuçlar aşağıda sıralanmaktadır.

1. Öngerilme uygulanmadan ve farklı öngerilmeler uygulanarak üretilen numunelerde, birleştirme bölgesinin tamamen soğuması sonucunda uygulanan öngerilmeler serbest bırakılmış ve kaynaklı birleştirmelerde kalıcı gerilmeler oluşturulmuştur.
2. Çekme/makaslama testi sonunda yapılan makro incelemelere göre kırılmaların kaynak dikişlerinde olmadığı, ana metale yakın bölgelerde (muhtemel ITAB) olduğu görülmüştür. Bunun sebebi ise, kaynak dikişinin mekanik özelliklerinin, ana metalin mekanik özelliklerinden daha yüksek olmasıdır.
3. Öngerilmesiz ve öngerilme uygulanarak üretilen kaynak dikişlerinin çekme/makaslama testi sonuçlarına göre, artan öngerilme miktarına bağlı olarak kaynak dikişlerinin akma dayanımlarında ve % uzamalarında düşüş olduğu görülmüştür. Bu düşüşlerin muhtemel sebebi, uygulanan öngerilmelerin kaynak dikişlerinde meydana getirdiği makaslama gerilmeleridir.
4. Fotoelastisite yöntemi ile gerilme analizi yapılan çekme levhasında, tek ekseninde bir gerilme olduğu ve oluşan gerilmelerin teorik belirlenen değerlere ortalama % 4 sapma ile yakın olduğu tespit edilmiştir.
5. Öngerilmeli lamada, uygulanan öngerilme miktarına bağlı olarak, alt lamada çekme, üst lamada basma kalıcı gerilmeleri oluşmuştur. Buna rağmen öngerilme yükü ekseninin birleştirmenin altında olmasından dolayı ters sehim meydana gelmiştir. Artan öngerilme miktarına bağlı olarak oluşan ters sehim miktarlarının da arttığı gözlemlenmiştir.

6. Öngerilme ile kaynaklı birleştirmede oluşturulan kalıcı gerilmelerin tahmini dağılımı şematik olarak gösterilmiştir. Ancak, diğer kalıntı gerilme analiz yöntemleri (rn. Delik delme metodu) kullanılarak bu gerilmelerin türü ve dağılımı belirlenebilir.

KAYNAKLAR

1. Weismon, C., “Fundamental of Welding”, 1., Welding Handbook, 7th Ed., *American Welding Society*, Miami, 1:221-264, (1976).
2. Ronald, H.J., “Welding of Carbon Steels”, Welding Brazing and Soldering, *ASTM Handbook*, 6:645-664, (1993).
3. Dieter, E.G., “Mechanical Metallurgy”, *Mc Grow Hill Book Co.*, UK, 3-69, 375-471, (1988).
4. İMO İstanbul Şubesi Çelik Yapılar Komisyonu Standardı Çalışması, “TS 3357 standardı’nın yerine geçmek üzere hazırlanan İMO-01/2005 Standardı’nın gerekliliği ve getirdikleri”, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 25-32, (2005).
5. Asarkaya, M., “Tersanelerde Uygulanan ve Uygulanabilecek Kaynak Yöntemleri”, *Gemi Mühendisliği ve Sanayimiz Sempozyumu*, 252-267, (2004).
6. Şerfiçeli, Y.S., “Kaynak Teknolojisi”, *Form Ofset*, Ankara, 15-85, (2003).
7. Şık, A., “Mig/Mag Kaynak Yöntemi ile Birleştirilen Çelik Malzemelerde İlave Tel Türleri ve Koruyucu Gaz Karışımlarının Eğmeli Yorulma Ömürlerine Etkilerinin Araştırılması”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 22, No 4, 769-777, (2007).
8. Özer, A., “Öngerilmeli Çelik I-Putrel Kiriş Üretilebilirliğinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 51-97, (2003).
9. Vural, H.İ., “Kafes Kiriş Sistemlerde Optimum Kaynak Sırası Planı Ve Distorsiyon (Çarpılma) Kuvvetlerinin Belirlenmesi”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 6-16,19-26 (2006).
10. Tülbentçi K., Zeren A., “ Kaynaklı Yapılarda Oluşan İç Gerilmelere Malzemenin Rölaksasyon Özelliğinin Etkisi”, *İTÜ Makine Fakültesi 2. Ulusal Kaynak Sempozyumu Kitabı*, İstanbul, 315-324, (1989).
11. Şengel M. A., “ Gemi Üretiminde Kaynak Nedeniyle Oluşan Deformasyonlar ve Artık Gerilmeler”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 4-14, (2005).
12. Gülbahar, B., Akay, S., “Hafif Alaşımli Yapı Çeliklerinin Ark Kaynağında Isıl Çevrimlerin Bilgisayar Yardımı İle Hesaplanması”, *İTÜ Makine Fakültesi 2. Ulusal Kaynak Sempozyumu Kitabı*, İstanbul, 198-199, (1989).
13. Özkara, H., “Kaynaklı Parçalarda Kalıntı Gerilmeler ve Distorsiyon”, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 1- 65, (1987).

14. Masubuchi, K., "Analysis of Welded Structures", **Pergamon Pres**, New York, 44-66, (1980).
15. Benli, S., "Kaynaklı Parçalarda Oluşan Artık Gerilmelerin İncelenmesi" Yüksek Lisans Tezi, **Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İzmir, 7- 9, 12-14, 22-30 (2004).
16. Wilson, W.M., "Welding and Brazing", Metals Handbook 6th, **American Society for Metals**, Ohio, 291-305, (1983).
17. Buzluk, M., "Elektrik ve Gazaltı Ark Kaynağında Kalıntı Gerilmelerin Ölçülmesi", **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara**, 50-52, 64-69, (2007).
18. Canacık, A., "Çeliklerin Kaynağında Açısıl Distorsiyon", Doktora Tezi, **Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 3-6, 59-119, 155, 165 (1998).
19. Lee, H.W., Kang, S. W., "The Relationship Between Residual Stress and Transverse Weld Cracks in Thick Steel Plate", **Welding Journal**, 225-230, (2003).
20. Yurioka, N., Suzuki, H., "Hydrogen Assisted Cracking in C-Mn and Low Alloy Steel Weldments", **International Materials Reviews**, 35(4): 217-245, (1990).
21. Hart, P.H.M., "Resistance to Hydrogen Cracking in Steel Weld Metals", **Welding Journal**, 65(5), 14-22, (1986).
22. Anık, S., Tülbentçi, K., Kaluç, E., "Örtülü Elektrot ile Ark Kaynağı", **Gedik Holding Yayını**, İstanbul, 11- 26, 165- 180 (1991).
23. Degarmo, E.P., Meriam, J.L., "The Effect of Weld Length upon the Residual Stresses of Unrestrained Butt Welds", **Welding Journal**, 25: 485-486, (1946).
24. Aktaş, Y., "I- Kiriş Üretiminde Köşe Kaynakları Kaynak Sırası Planının Distorsiyon Kuvvetlerine Etkilerinin Araştırılması", **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara**, 1-4, 30-42, (2007).
25. Aydoğan, M.Ö., "Kaynaklı Yapılardaki Artık Gerilmelerin ve Distorsiyonların Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi", Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 1-23, (1999).
26. Baş, H., "Kaynaklı Bir Gemide Oluşan Distorsiyonlar ve Giderilme Esasları", Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 25-82, (1992).

27. Külekçi, M.K., Ertürk, İ., “Kaynaklı Yapılarda Çekme ve Çarpılmalar”, **Kaynak Teknolojisi I. Ulusal Kongresi**, Ankara, 179-189, (1997).
28. Akyol, E.C., “ Çelik Konstrüksiyonlarda Malzeme, Kaynak Yöntemi ve Konstrüksiyon İlişkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 74-81, (1994).
29. Karakaş, Ö., Gülsöz, A., “Kaynaklı Birleştirmelerin Statik ve Yorulma Dayanımına Etki Eden Faktörler”, **Mühendis ve Makine**, Cilt: 48, Sayı 573, 10-17, (2007).
30. Yiğit, O., Dilmeç, M., Halkacı, S., “Tabaka Kaldırma Yöntemi ile Kalıntı Gerilmelerin Ölçülmesi ve Diğer Yöntemlerle Karşılaştırılması”, **Mühendis ve Makine**, Cilt: 49, Sayı: 597, 20-27, (2008).
31. Schajer, G. S., “Residual Stresses: Measurement by Destructive Testing”, **Encyclopedia of Materials: Science and Technology**, Elsevier, 8152- 8158, (2001).
32. İnternet:Yelbay, H. İ., “Tahribatsız Yöntemlerle Kalıntı Gerilim Ölçümündeki Gelişmeler”, **3rd International Non-Destructive Testing Symposium and Exhibition**, İstanbul, (2008).
33. Prime, M. B., “Residual Stres Measurement by Successive Extension of a Slot: The Crack Compliance Method”, **Applied Mechanics Reviews**, 52, (2): 75-96, (1999).
34. Kocaoğlu, D., “Türkiye Mühendislik Haberleri”, **Mühendisler Mimarlar Odası**, 22, (1961).
35. Özkır, S.E., “Düz ve Eğimli Yerleştirilmiş Farklı İmplant Tasarımları Üzerine Yapılan Sabit Restorasyonların Fotoelastik Stres Analizi ile İncelenmesi”, **Ankara Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 40-47, (2007).
36. “GEKA Kaynak Kataloğu”, **Gedik Holding Yayınları**, İstanbul, 110, (2007).
37. Eryürek, İ.B., “Kaynak Teknolojisi”, **As Kaynak Yayınları**, 2. Baskı, 80-86, (2007).
38. Vishay Application-Note IB-221-D, “Instructions for Casting and Contoured PhotoStress® Sheets”, 1-11, (2007).
39. Özçatalbaş, Y., “MET-214 Konstrüksiyon ve Elemanları Ders Notları”, **Gazi Üniversitesi Teknik Eğt. Fak. Metal Eğitimi Bölümü**, Ankara, 1-4, 14-16 (1999).

40. Vishay Application-Note IB-223-H, "Instructions for Bonding Flat and Contoured PhotoStress® Sheets", 1-10, (2009).
41. Vishay Application-Note IB-237, "PhotoStress® Separator Gage Installations with M-Bond 200 Adhesive", 1-5, (2005).
42. Vishay Tech-Note TN-701-1, "Calibration of PhotoStress® Coating" 1-6, (2009).
43. Vishay Tech-Note TN-708-2, "Principle Stress Separation in PhotoStress® Measurement" 1-11, (2006).
44. Omurtag, M.H, "Mukavet Cilt-I", *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 59-89, (2005).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ÇEVİK, Bekir
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 11.08.1983 Mustafakemalpaşa
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (555) 448 21 49
 e-mail : cevikbekir06@hotmail.com.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birim	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	G.Ü. / Metal Eğitimi A.B.D.	2009
Lisans	G.Ü. / Metal Eğitimi Böl.	2006
Lise	Mustafakemalpaşa End. Mes. Lisesi	1999

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2008–2009	Gazi Üniversitesi Atatürk MYO	Öğretim Görevlisi (Dış. Görv.)
2007–2008	Gazi Üniversitesi Atatürk MYO	Öğretim Görevlisi (Dış. Görv.)
2006–2007	Melek İPEK İ.Ö.O.	Vekil Öğretmenlik

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Doğa gezintisi, Kitap okuma