T.C.

TRAKYA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KAYNAKLI MALZEMELERDE DİSTORSİYON ANALİZİ

HASAN İLKER ÇELİKER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

İMALAT VE KONSTRÜKSİYON A.B.D.

Tez Danışmanı: PROF. DR. MÜMİN ŞAHİN

EDİRNE-2018

HASAN İLKER ÇELİKER' in hazırladığı "KAYNAKLI MALZEMELERDE DİSTORSİYON ANALİZİ" başlıklı bu tez, tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından İmalat ve Konstrüksiyon Anabilim Dalında bir Yüksek lisans/ Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri (Unvan, Ad, Soyad):	İmza
Prof. Dr. Mümin ŞAHİN	.....
Prof. Dr. Hüseyin Erol AKATA	.....
Doç. Dr. Cenk MISIRLI	.....
.....	.....
.....	.....

Tez Savunma Tarihi: 12/10/2018

Bu tezin Yüksek Lisans/Doktora tezi olarak gerekli şartları sağladığını onaylarım.

İmza

Prof. Dr. Mümin ŞAHİN

Tez Danışmanı .....

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü onayı

.....

Prof. Dr. Murat YURTCAN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdür Vekili

T.Ü.FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ A.B.D. YÜKSEK LİSANS/DOKTORA PROGRAMI

DOĞRULUK BEYANI

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında, tüm verilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini, kullanılan verilerde tahrifat yapılmadığını, tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını, kullanılan tüm literatür bilgilerinin bilimsel normlara uygun bir şekilde kaynak gösterilerek ilgili tezde yer aldığını ve bu tezin tamamı ya da herhangi bir bölümünün daha önceden Trakya Üniversitesi ya da farklı bir üniversitede tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

12 / 10 / 2018

Hasan İlker ÇELİKER

Yüksek Lisans Tezi

Kaynaklı Malzemelerde Distorsiyon Analizi

T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği A.B.D.

ÖZET

Malzemelerin birleştirme yöntemlerinden biri de kaynaktır. Malzemelerde kaynak yapıldıktan sonra, kaynak soğurken geçen sürede malzemede büzülmeler olabilir. Bu büzülmeler malzeme de artık gerilme ve distorsiyon meydana getirir. Artık gerilmeler, malzemenin üzerindeki gerilmeler hariç olan gerilmelerdir ve malzemede çeşitli hasarlara sebep olabilir. Distorsiyonlar ise malzemenin boyutunu etkileyen parametredir. Malzemede meydana gelen artık gerilmelerin ve distorsiyonların olumsuz etkilerini yok edebilmek için kaynak yapıldıktan sonra yapılması zorunlu bazı işlemler vardır. Geçmiş yıllardan bu yana birçok araştırmacı tarafından bu tür gerilmelerin ve distorsiyonların ortaya çıkış sebepleri araştırılmış ve önlemler alınmaya çalışılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar meydana gelen olumsuz koşulları incelemeye ve gerekli tedbirleri almaya yeterli olmamıştır. Günümüz teknolojisinde tasarımcılar ve mühendisler, kaynak işlemini bilgisayar ortamında fiziksel olarak simüle eden programlar kullanmaktadır ki, sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan bu programlar daha hassas, sorunun kaynağını tespit edebilen ve önceden gerekli müdahalelerin yapılabileceği bir ortam sunmaktadır.

Çalışmamızda elektrik ark kaynağı ile birleştirilen iki adet malzeme üzerindeki artık gerilmeler, sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan Ansys Workbench programı kullanılarak analiz edilmiştir.

Yıl : 2018

Sayfa Sayısı 40

Anahtar Kelimeler : Kaynaklı İmalat, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Ansys Workbench, Isıl Analiz, Statik Analiz, Artık Gerilmeler

Master’s Degree Thesis

The Analysis Of Distortions in Welded Materials

Trakya University Institute of Sciences

Department of Mechanical Engineer

ABSTRACT

Welding is one of the methods of combining pieces of metal material. Once the welding is done, there might be contractions in the material while the welding is cooling off. These contractions cause residual stress and distortions in the material. Residual stresses are the tensions other than the ones that normally occur in the material, and these tensions might lead to various damages. Distortions, on the other hand, make up the parameter that affects the dimensions of the material. In order to avoid the negative effects of the residual stresses and distortions in the material, there are additional processes that need to be done after welding. The causes of the occurrence of such tensions and distortions have been made for preventive actions over the previous years. The experimental work done for his purpose was not adequate enough to shed light on the study of the negative consequences that arose, and to take the necessary precautions. In today's technology, designers and engineers are using programmes that physically simulates welding processing on the computer, and such programmes that uses finite elements method. Provides a medium where the causes of the problems can be determined at a greater precision and the necessary preventive interventions can be made in advance.

In this paper, the residual stresses detected on a two piece metal material welded by means of arc welding have been analyzed by means of the programme named Ansys Workbench that operates with finite elements method.

Year : 2018

Number of Pages : 40

Keywords : Welded Manufacturing, The Finite Element Analysis, Ansys Workbench, The Thermal Analysis, The Static Structural Analysis, Residual Stresses

TEŞEKKÜR

Geçmiş yıllardan bu yana önemli bir araştırma konusu olup hem uluslararası çalışmalarda hem de ülkemizde üzerinde çalışılan kaynaklı malzemede distorsiyon analizi üzerinde çalışmam için bana bu imkânı veren, her türlü bilgi, birikim ve tecrübelerini benimle paylaşan saygıdeğer hocam Sayın Prof. Dr. Mümin ŞAHİN'e,

Bana Ansys programı ile çalışmamda yardımcı olan, her türlü teknik desteği veren ve emeği geçen Sayın Burak ÖZCAN ve Sayın Fırat GÜNGÖRDÜ hocama,

Bana olan inançlarını kaybetmeden her zaman yanımda olan sevgili anne ve babama,

Maddi ve manevi her türlü desteğini benden esirgemeyen tüm sevdiklerime teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1
GİRİŞ

1.1. Giriş 1

BÖLÜM 2
KAYNAK İŞLEMİ

2.1. Kaynağın Tarifi 2
2.2. Elektrik Ark Kaynağı 3
2.3. Kaynaklı Birleştirme Çeşitleri 3
2.3.1. Alın ve Kıvrık Alın Kaynak Birleştirmeleri 4
2.3.2. İç Köşe Kaynak Birleştirmeleri 4
2.3.3. Dış Köşe Kaynak Birleştirmeleri 4
2.3.4. Bindirme Kaynak Birleştirmeleri 4

BÖLÜM 3
ÇELİKLERDE KAYNAK KABİLİYETİ

3.1. Çeliklerde Kaynak Kabiliyeti 5
3.2. Eriyen Bölge 5
3.3. Isı Tesiri Altındaki Bölge 6

BÖLÜM 4
KAYNAKTA MEYDANA GELEN ÇARPILMALAR

4.1. Artık Gerilmelerin Oluşumu 8
4.2. Çarpılmalar 8

BÖLÜM 5
ÇELİĞİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

5.1. Malzemelerin Mekanik Özellikleri 10
5.2. Isı İletim Katsayısı 10
5.3. Özgül Isı 11
5.4. Yoğunluk 11
5.5. Isı Transfer Katsayısı 12
5.6. Arkta Meydana Gelen Olaylar 12

BÖLÜM 6
KAYNAKTA MEYDANA GELEN DİSTORSİYONLAR VE GERİLMELER

6.1. Gerilme ve Distorsiyonların Esasları 13
6.1.1. Isıl Gerilmeler 14
6.1.1.1. Sıcaklık Farkı 14
6.1.1.2. Elastiklik Modülü 15
6.1.1.3. Isıl Uzama Katsayısı 15
6.2. Distorsiyon Çeşitleri 15
6.2.1. Enine Distorsiyonlar 15
6.2.2. Boyuna Distorsiyonlar 16
6.2.3. Açısal Distorsiyonlar 16
6.2.4. İç Köşe Birleştirmelerinde Distorsiyonlar 17
6.2.4.1. Enine Distorsiyonlar 16
6.2.4.2. Boyuna Distorsiyonlar 17
6.2.5. Açısal Distorsiyon 17
6.3. Kaynak Artık Gerilmeleri 18
6.3.1. Yapı Elemanının Dış Gerilmeleri 18

BÖLÜM 7
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ VE ANSYS PROGRAMI

7.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi 22
7.2. Sonlu Eleman Sisteminin Modelinin Oluşturulması 22
7.2.1. Elemanlara Ayırma 22
7.3. Kaynak İşleminin Modellenmesi 24
7.3.1. Termal Model Analizi 24

7.3.2. Mekanik Model Analizi 26
7.3.2.1. Yapı Denklemleri 26
7.4. Kaynak İşleminin Sonlu Elemanlar Programı İle Analizi 27
7.4.1. Problemin Tanımı 27
7.4.2. Termal Analiz 28
7.4.3. Yapısal Analiz 34

BÖLÜM 8
SONUÇ

8.1. Sonuç 36

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

1. Simgeler Dizini

mm	milimetre
dk	dakika
º	derece
C	santigrat
q	ısı iletim katsayısı
F	Fahrenhayt
MPa	MegaPascal
M	moment
t	kalınlık

2. Kısaltmalar Dizini

ITAB: Isı Tesiri Altındaki Bölge

AISI: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü

ÇİZELGELER VE ŞEKİLLER DİZİNİ

Çizelge 7.1. AISI 304 Çeliğin Sıcaklığa Bağlı Fiziksel ve Mekanik Özellikleri…….30

Şekil 2.1. Kaynak Kabiliyeti 2

Şekil 2.2. Elektrik Ark Kaynağı.....3

Şekil 3.1. Alın ve Köşe Birleştirmelerinde Segregasyon Bölgeler 5

Şekil 3.2. Kaynak Dikişi ve Çevresinde Sıcaklık ile Tanesel Yapı Değişimi.....6

Şekil 3.3. Yüksek Mukavemetli Bir Çeliğin Kayanğında ITAB' da ki Sıcaklık Dağılımı.....7

Şekil 4.1. Kaynak Çevresinde Oluşan Çekme ve Basma Gerilmeleri 8

Şekil 4.2. Kaynaklı Levhanın Boydan ve Enden Çekerek Çarpılması 9

Şekil 5.1. Isı İletim Katsayısının Sıcaklık ve Karbon Miktarına Bağlı Değişimi…….11

Şekil 5.2. Arkta Meydana Gelen Olaylar..... 12

Şekil 6.1. Elastik Şekil Değişimi 14

Şekil 6.2. Plastik Şekil Değişimi.....14

Şekil 6.3. Dikişinin Oluşum Şeklinin Distorsiyon Üzerine Etkisi 16

Şekil 6.4. T Birleşiminde Artık Gerilme Dağılımı… 17

Şekil 6.5. T Birleşiminde Açısal Distorsiyon 18

Şekil 6.6. Farklı Uzunluktaki Çubukların Uç Kısımlarından Birleştirilmeleri İle Meydana Gelen Artık Gerilmeler.....18

Şekil 6.7. Tespit Edilmiş Çubuğun Isıtılmasının Artık Gerilme Üzerine Etkisi 19

Şekil 6.8. Sıcaklık ve Gerilme Dağılımı 20

Şekil 7.1. Sabit Kesitli Çubuk… 23

Şekil 7.2. Elemanlara Bölünmüş Model 23

Şekil 7.3. Eleman ve Düğümlere Ayrılmış Model..... 24

Şekil 7.4. Parçanın 3 Boyutlu Modeli..... 28

Şekil 7.5. Modelimizin Meshleme İşlemi Yapıldıktan Sonraki Görünüşü…. 29
Şekil 7.6. Kaynaktan Yaklaşık 20 Saniye Sonraki Sıcaklık Durumu…. 31
Şekil 7.7. Kaynaktan Yaklaşık 1 Dakika Sonraki Sıcaklık Durumu… 31
Şekil 7.8. Kaynaktan Yaklaşık 4 Dakika Sonraki Sıcaklık Durumu… 32
Şekil 7.9. Kaynaktan Yaklaşık 15 Dakika Sonraki Sıcaklık Durumu… 32
Şekil 7.10. Kaynaktan Yaklaşık 30 Dakika Sonraki Sıcaklık Durumu… 33
Şekil 7.11. Kaynaktan Yaklaşık 30 Dakika Sonra Parçada Sıcaklık Dağılımı..... 33
Şekil 7.12. X Ekseni Yönündeki Artık Gerilmelerin Dağılımı..... 34
Şekil 7.13. Y Ekseni Yönündeki Artık Gerilmelerin Dağılımı..... 35
Şekil 7.14. Parçada Meydana Gelen Toplam Deformasyon Hali 35
Şekil 8.1. Parçadaki Artık Gerilme Dağılımı..... 37

BÖLÜM 1
GİRİŞ

1.1. Giriş

Kaynak işlemi, iki metalin birbiri ile kaynak metalinin ergime sıcaklığına ulaşması ile yapılan birleştirilme işlemidir. Kaynak işlemi yapılan malzemeler soğumaya bırakıldıklarında çeşitli artık gerilmeler ve distorsiyonlar oluşmaya başlar. Oluşan bu gerilmeler ve distorsiyonlar malzemenin imal edilebilirliğini, güvenliğini ve tasarımını etkiler.

Geçmiş yıllarda birçok araştırmacı bu konu ile ilgilenmişlerdir. Çeşitli deneysel çalışmalar yapılmış ve çeşitli bağlantı tiplerinde meydana gelebilecek gerilmeler incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar metotlara dökülmüş ve günümüz sonlu elemanlar yöntemlerinin ve analizlerin temelini oluşturmuştur.

Sunulan çalışma ile ilgili geçmiş yıllardan örnek verecek olursak, 2001 yılında Murugan ve arkadaşları AISI 304 tip paslanmaz çeliklerde çok pasolu kaynak işlemi sonucunda meydana gelen sıcaklık dağılımı ve artık gerilmeleri X ışını difraksiyon yöntemi ile ölçmüştür. Farklı kalınlıkta yapılan malzemelerde oluşan artık gerilmeler ve sıcaklık dağılımı gözlenmiştir. Yapılan bu çalışma ile malzemelerde yapılan kaynak işleminde meydana gelen sıcaklık dağılımının ve oluşabilecek artık gerilmelerin önceden bilinmesinin önemi ortaya çıkmıştır.

Sunulan çalışmada, AISI 304 tip paslanmaz çelik sac ile T şeklinde birleştirilecek iki saçta meydana gelebilecek sıcaklık dağılımlarını ve artık gerilmeleri incelemek olmuştur. Çalışmada sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan Ansys Workbench programı kullanılmış olup hem ısıl hem statik analiz yapılmıştır.

BÖLÜM 2
KAYNAK İŞLEMİ

2.1. Kaynağın Tarifi

Kaynak, malzemelerin kaynak bölgesinde ısı veya basınç yardımıyla, ilave malzeme kullanarak veya kullanmadan birleştirilmesidir.

Metal Kaynağı: Metallerin ısı veya basınç kullanılarak, bazen ilave metal ekleyerek birbiri ile birleştirme yöntemidir.

Plastik Malzeme Kaynağı: Yalnızca termoplastik olan malzemelerin ısı veya basınç kullanılarak, bazen ilave malzeme ekleyerek yapılan birleştirme yöntemidir.

Kaynaklı imalatta amaç, malzemelerin herhangi bir yöntem kaynağının yapıldıktan sonra malzemenin mekanik özelliklerini koruyarak, korozyona uğramayıp görevini yerine getirebilmesidir. Kaynaklı bağlantılardan istenilen bu özelliklerin tümüne "**kaynak kabiliyeti**" adı verilir.



Şekil 2.1. Kaynak kabiliyeti (Ünal, s.3)

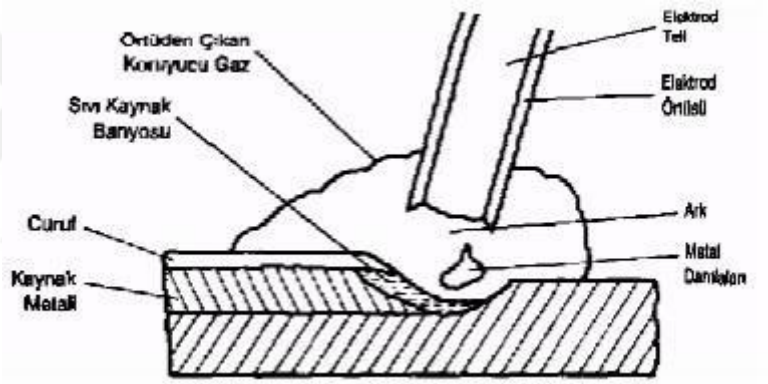
Kaynak tekniklerinde ısının da etkili olduğunu unutmamak gerekir. Yüksek sıcaklıklar sebebi ile malzemede, hem kaynak banyosunda hem de kaynağın yapıldığı yere yakın yerlerde mekanik ve fiziksel değişiklikler yaşanmaktadır.

2.2. Elektrik Ark Kaynağı

Arkın, eriyen elektrot çubuk ile iş parçası arasında oluştuğu ve kaynak banyosunun eriyen elektrottan açığa çıkan gazlar ile korunduğu birleştirme yöntemidir.

Elektrik ark kaynağı ile yapılacak olan kaynak işlemi için gereken ısı, ark tarafından sağlanmaktadır. Kaynak ağzını doldurmak için gerekli ek kaynak metalinin katılma biçimi ve kaynak bölgesinin havanın olumsuz etkilerinden korunma biçimine göre çok çeşitli ark kaynak yöntemleri geliştirilmiştir. MIG/MAG kaynağından sonra günümüzde en çok kullanılan yöntemlerden biri de elektrik ark kaynağıdır (Anık, 1991).

Yapılan kaynak işleminde, iş parçası ile ana metal arasında kalan elektrot, ark ile sağlanan ısı yardımı ile ergiyerek kaynak metaline dönüşür. Ergime esnasında ortaya çıkan gaz, kaynak bölgesini koruyarak, kaynağın dış etkenlerden zarar görmesini engeller (Benli, 2000).



Şekil 2.2. Elektrik ark kaynağı (Benli, 2004, s.9)

Kaynak için gerekli olan akım, kaynak akım üreteci ile sağlanır. Penseye takılan elektroda kablolar yardımı ile elektrik akımı iletilir. Kaynak akım üreteci tarafından sağlanan elektrik akımı, kablolar yardımı ile iş parçası ve elektrot pensesine iletilir. Elektrot penseye takılır ve iş parçasına dokundurularak ark oluşturulur.

2.3. Kaynaklı Birleştirme Çeşitleri

Kaynak tasarımında kullanılan birleştirme türleri beş grup altında toplanabilir:

a) Alın ve Kıvrık Alın Birleştirmeleri
b) İç Köşe Birleştirmeleri
c) Dış Köşe Birleştirmeleri

d) Bindirme Birleştirmeleri

2.3.1. Alın Ve Kıvrık Alın Kaynak Birleştirmeleri

İki farklı malzemenin birbirlerine alından birleştirmek suretiyle yapılan kaynak işlemidir. Malzemeler alın kısımları birbirlerine değecek şekilde karşılıklı getirilir ve aralarına kaynak işlemi uygulanarak " V " şeklinde bir kaynak ağzı görünümünde kaynak dikişi meydana geldiği gözlenir.

2.3.2. İç Köşe Kaynak Birleştirmeleri

Malzemelerin birbirlerine 90º dikey gelecek şekilde yerleştirilerek yapılan kaynak işlemidir. Yapılan işlemde bir malzemenin alın kısmı, diğer malzemenin yüzey kısmına denk gelecek şekilde yerleştirilerek kaynak işlemi yapılır ve elde edilen kaynak dikişi dik üçgen şeklinde ortaya çıkmaktadır.

2.3.3. Dış Köşe Kaynak Birleştirmeleri

Malzemelerin köşelerinin dış kısımlarının birbirlerine dikey gelecek şekilde yerleştirilerek yapılan kaynak işlemidir. Malzemenin alın kısmı, diğer malzemenin alın kısmına doğru yerleştirilerek yapılır.

2.3.4. Bindirme Kaynak Birleştirmeleri

Malzemelerin birbirleri üstüne, ısıyı eşit şekilde dağıtabilecek şekilde yerleştirilerek yapılan kaynak işlemidir. Malzemeler genellikle birbirlerini ortalayarak ya da alın kısımları eşit mesafe olacak şekilde yerleştirilerek yapılır. Paralel ve bindirme olarak iki çeşidi mevcuttur.

BÖLÜM 3
ÇELİKLERDE KAYNAK KABİLİYETİ

3.1. Çeliklerde Kaynak Kabiliyeti

İmalat tekniğinde, malzemelerin bir araya getirilerek bir bütün oluşturması ve bu bütünün her türlü emniyet şartını yerine getirerek, düşük maliyetli, kolay işlenebilir ve estetik olması amaçlanmıştır.

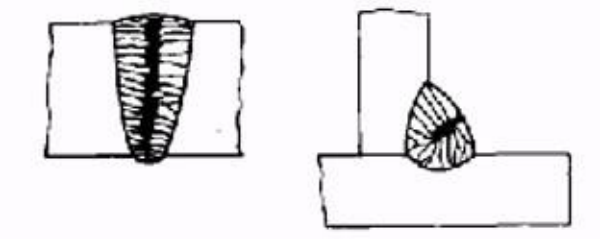
Kaynaklı imalat tekniğinde ise, kaynak ile birleştirilecek parçaların çalışma koşulları bozulmadan birleştirilmesi amaçlanmıştır ki, bu koşulların yerine getirilebilirliğine kaynak kabiliyeti denilir.

Kaynak; bir ergitme ve sonra da katılaşma olayı olduğundan kendine özgü bir metalurjik yapı ile doğar. Kaynak dikişinin ana yapısı ana metalden farklıdır. Kaynak bölgesi iki farklı yapıdan oluşmaktadır; eriyen bölge ve ısı tesiri altındaki bölge.

3.2. Eriyen Bölge

Elektrot ile iş parçası arasında oluşan ark ile meydana gelen kaynak banyosunun, ana metal ile karışımından oluşan kaynak bölgesidir. Bu karışımda ana metalin kaynak metaline oranı, kaynak usulü ve ağız biçimine bağlıdır (Anık, 1991).

Kaynak banyosunda iyi bir kaynak dikişi elde edebilmek için, kaynak bölgesini havanın etkisinden korumak veya kaynak bölgesinde oluşabilecek kimyasal ve metalurjik olayların önlenmesi gerekir. Kaynak dikişinin yapısı tane büyüklüğü bakımından da homojen değildir. Tane yapısına etkiyen ilk faktör soğuma olayıdır. Soğuma yavaş olursa iri taneler, hızlı olursa ince taneler oluşur. Taneler, ısının en çok kaçtığı yöne uzarlar. Buna yapının yönlenmesi adı verilir. Tanelerin yönlenmesi hiç iyi değildir.



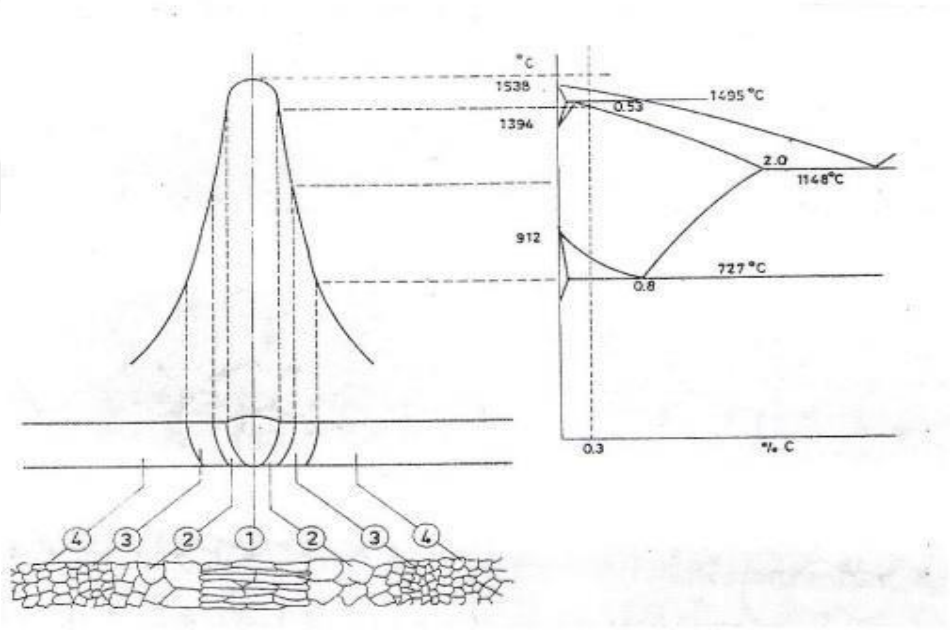
Şekil 3.1. Alın ve köşe birleştirmelerinde segregasyon bölgeler (Ertürk, Durukan, Şentürk, 2017)

3.3. Isı Tesiri Altındaki Bölge

Şekil 3.2.'de kaynak dikişinde ve ısı etkisi altında kalan alanda sıcaklık-tane yapısı ilişkisi gösterilmiştir. Karbonlu çeliklerde zayıf kaba perlit ve sert martenzit yapıya rastlanır. Isı tesiri altında kalan bölge, kaynak yapılacak olan ana metalin özelliklerini taşımaz. Aynı zamanda herhangi bir erime olmadığı için kaynak metaline ait özellikleri de yansıtmaz. Birleştirilecek olan malzemelerin kütlesine yakın taneler ince ve eş yönlenmiş taneler şeklinde kristalleşecektir. Ergime sıcaklığına ulaşmış kaynak dikişi haricindeki bölgelerde, alt kritik sıcaklık seviyelerine (727-723 ºC) ulaşan bir ısı, metali etkiler. Metal ile kaynak dikişi arasındaki bu bölgeye ısı tesiri altında kalan bölge adı verilir (Çelik, 2006).

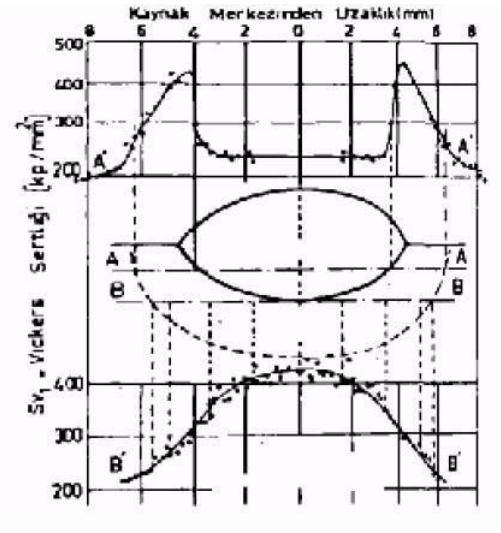
Isı tesiri altındaki bölgedeki değişikler şunlardır:

1- Ana metaldeki mevcut tanesel yapı bozulur, yeni bir yapı oluşur.
2- Ana metalin daha önce ısıl işlemlerle kazanmış olduğu özellikler yok olur (Çelik, 2006).



Şekil 3.2. Kaynak dikişi ve çevresinde sıcaklık ile tanesel yapı değişimi (Çelik, s.15)

Isı tesiri altındaki bölgedeki sıcaklık dağılımı ve soğuma hızının bilinmesi halinde, kaynaktan sonra ısının tesiri altındaki bölgedeki iç yapı bilinebilir; içeriğinde %0,3'ün üzerinde karbon olan alaşımsız yapı çelikleri ve yüksek mukavemetli hafif alaşımlı yapı çeliklerinde, ısının tesiri altında kalan bölgenin sıcaklığı 900˚C'yi geçmiş ve tavlanmış kısımlarında, çok sert bir yapı oluşur. Bir alın kaynağında ITAB' taki sertlik dağılımı şekildeki gibidir:



Şekil 3.3. Yüksek mukavemetli bir çeliğin kaynağında ITAB' taki sertlik dağılımı

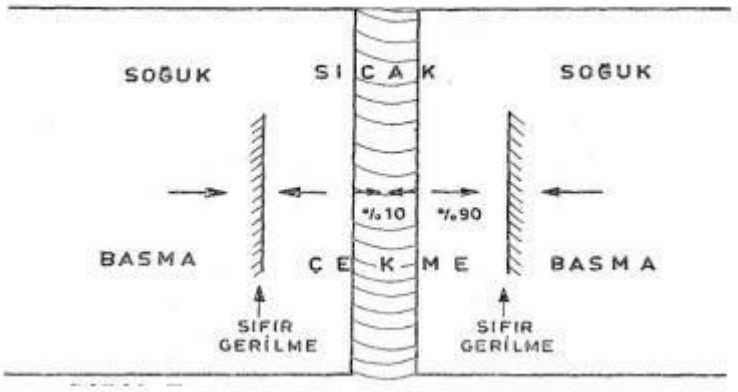
Elektrik ark kaynağında kaynak kabiliyeti, ısıl iletkenlik ve ergime noktasına bağlıdır. İletkenlik değerinin yüksek oluşu, kaynağın yapılabilmesi için gerekli olan ısının oluşmasını engeller. Bunun sonucunda sağlıklı bir kaynak dikişi elde edilemez. Bu yüzden iyi bir kaynak için ısıl iletkenliği düşük malzeme gereklidir. Ergime noktasının yüksek olması ise kaynak için gerekli ısıyı artırmaktadır.

BÖLÜM 4

KAYNAKTA MEYDANA GELEN ÇARPILMALAR

4.1. Artık Gerilmelerin Oluşumu

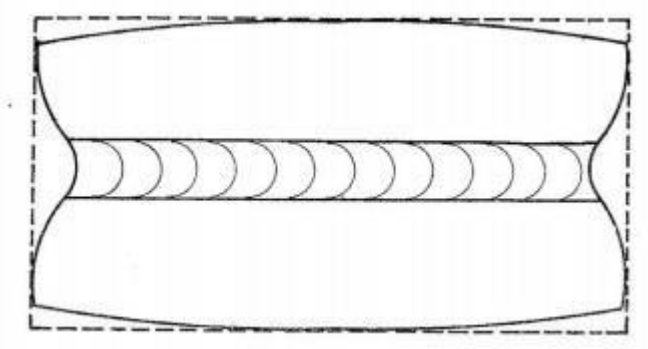
Malzemeler üzerlerinde sıcaklık artışı meydana geldiğinde genleşir, sıcaklık düşüşü meydana geldiğinde çekerler. Genleşme veya çekmeyi engelleyecek bir durum oluştuğunda malzemede iç gerilmeler oluşur. Çelik 150˚C 'de ısıtılırsa artık gerilmeler oluşabilir. Kaynak dikişi, kendi sıcaklığından daha düşük bir sıcaklıkta ana metal ile çevrili olduğundan, kaynak dikişi soğuma yaparken, ana metal kaynak dikişinin çekmesini engeller ve dikiş içerisinde çekme gerilmeleri kalabilir. Isı etkisi altındaki bölge çok yüksek sıcaklıklara kadar ısınır. Soğuma esnasında bu bölgelerde oluşan çekmeler kaynak dikişine zıt yöndedirler. Böylelikle ana metal dikişindeki iç gerilmeler daha da artmış olur (Benli, 2004).



Şekil 4.1. Kaynak çevresinde oluşan çekme ve basma gerilmeleri (Çelik, s.19)

4.2. Çarpılmalar

Kaynak işlemindeki bölgesel sıcaklık farklılıkları genleşmeye ve çekmeye neden olur. Bu olay da çarpılmalara yol açar.



Şekil 4.2. Kaynaklı levhanın boydan ve enden çekerek çarpılması (Çelik, s.20)

Şekil 4.2.'de yapılan kaynaktan sonra hem boyuna hem enine çarpılmalar göze çarpmaktadır. Genellikle düz ve ince levhalarda kaynaktan sonra dalgalanma, dikiş arasındaki bölgelerde ise kabarıklıklar görülür.

Kaynak yaparken meydana gelen içyapıyı anlamak, kaynak sonrası ortaya çıkabilecek hataların sebebini izah edebilmek için aşağıdaki parametrelerin bilinmesi gerekir:

a. Isınma ısısı
b. Maksimum sıcaklık
c. Maksimum sıcaklığın süresi
d. Soğuma hızı

BÖLÜM 5
ÇELİĞİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

5.1. Malzemelerin Mekanik Özellikleri

Kaynak işlemi sırasında kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri, kaynak bölgesinde meydana gelen ısıl çevrim sırasında oluşan metalürjik dönüşümler nedeniyle değişebilir. Kaynak bölgesinde meydana gelen metalürjik dönüşüme, malzemenin ısıl özellikleri ve geometrisi etki eder.

Malzemeye ilk anda verilen sıcaklık ile ergime sıcaklığına ulaştığı ana kadar geçen süre içerisinde malzemede birçok ısıl değişiklikler meydana gelmektedir. Kaynak sırasında ısı tesiri altında kalan bölgedeki bu değişiklikleri inceleyebilmemize yarayan parametreler aşağıda verilmiştir:

a. Isı İletim Katsayısı
b. Özgül Isı
c. Yoğunluk
d. Isı Transferi Katsayısı

5.2. Isı İletim Katsayısı

Bir cismin farklı sıcaklıktaki bölgeleri arasında yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa doğru geçen enerji, iletimle ısı geçişi olarak tanımlanır.

$q= -k.A.(T_2-T_1)/L$ …….(5.1)

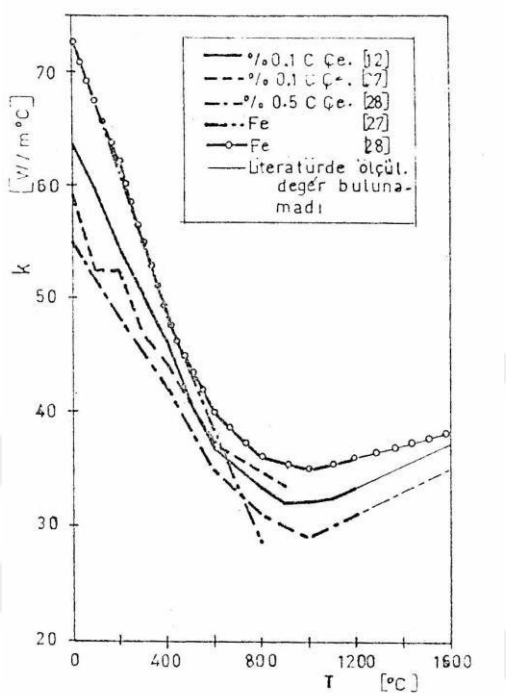
5.1. no'lu denklemde;

A= yüzey alanı
T_1= ilk sıcaklık
T_2= son sıcaklık
L= kalınlık
k= ısı iletim katsayısı

Isı iletim katsayısı, malzemenin birim kalınlığında meydana gelebilecek olan sıcaklık artışının iletim hızıdır. Malzemelerde değişkenlik gösterebilir.

Isı iletim katsayısı sıcaklığın bir fonksiyonu olup, basınç ile değişimi ihmal edilebilecek kadar düşük bir değerdedir.

Çeliklerde ısı iletim katsayısı, içeriğindeki karbon ve alaşım elementlerinin türüne ve miktarına bağlı olarak değişir. Karbonun, çelik içerisindeki oranı yükseldikçe ısıyı iletme kabiliyeti azalmaktadır.



Şekil 5.1. Isı iletim katsayısının sıcaklık ve karbon miktarına bağlı değişimi

5.3. Özgül Isı

Bir maddenin sıcaklığını 1˚ değiştirmek için gerekli olan ısı miktarıdır. Bir başka deyişle bir cismin ısısının sıcaklığına türevidir. Basınç, hacim ve sıcaklık şartlarına göre değişebilir.

5.4. Yoğunluk

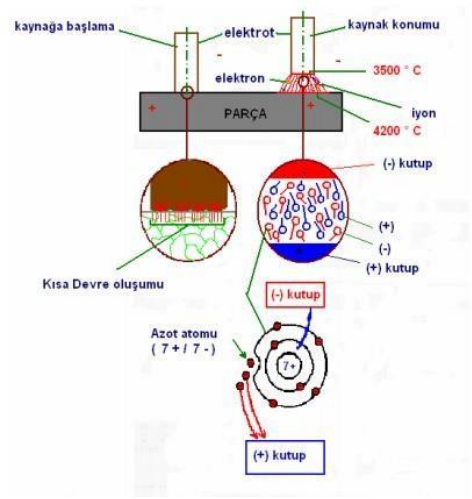
İçindeki karbon miktarı, alaşım elementi ve sıcaklığa bağlı olarak değişir.

5.5. Isı Transfer Katsayısı

Isı transferi katsayısı, malzemenin birim kalınlığında meydana gelebilecek olan sıcaklık artışının iletim hızıdır. Fiziksel bir özelliktir. Malzemelerde değişkenlik gösterebilir.

5.6. Arkta Meydana Gelen Olaylar

Kaynak ile birleştirilecek parçalar arasında bir akım oluşturabilmek için, kaynak yapılacak olan bölgedeki havanın elektriksel iletkenliğinin sağlanması gerekir. Ark, elektrotun iş parçasına dokundurulması ile başlar. Dokunma ile meydana gelen kısa devre sonucu açığa çıkan ısı, elektrotun ucunda yoğunlaşır ve akım ile birlikte elektrottan iş parçasına doğru elektronlar hız kazanır. Elektronlar ark bölgesinde nötr atomlara çarparak, atomların serbest kalıp hız kazanmasına neden olurlar ve bu şekilde daha çok elektron harekete geçer. Bu olaya çarpma iyonizasyonu adı verilir. Bu çarpışma sonucu elektron kaybederek artı yüklü iyonlara dönüşen gaz atomları eksi yüklü elektroda doğru hareket ederler.



Şekil 5.2. Arkta meydana gelen olaylar

BÖLÜM 6

KAYNAKTA MEYDANA GELEN DİSTORSİYONLAR VE GERİLMELER

6.1. Gerilme ve Distorsiyonların Esasları

Cisimlerin uygulanan dış kuvvetlere karşı verdiği tepkiye mekanik davranış adı verilir. Sürekli artan kuvvet altında önce şekil değiştirme başlar. Uzun olan bir malzeme, ısıtıldığında serbest olarak hareket edebiliyorsa boyu uzar. Isınan bir malzemenin uzama miktarı şu şekilde ifade edilir:

$\Delta l = l.\Delta t.\alpha_L$

Δl= çubuğun uzama miktarı (mm)

l= çubuğun ısıtılmadan önceki boyu (mm)

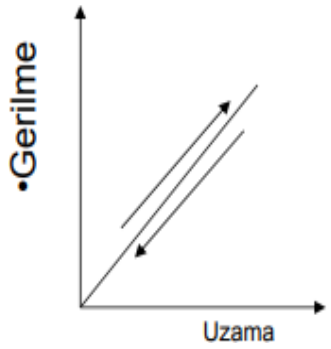
Δt= çubuğun başlangıç ve son sıcaklıkları arasındaki fark (^oC)

α_L= ısıl uzama katsayısı ($mm/^oC$)

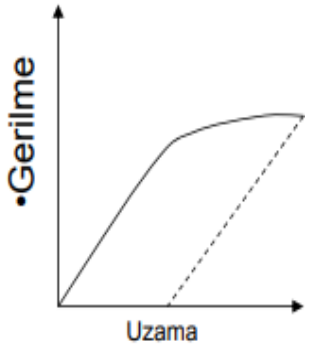
Parça soğuduğu zaman tekrar eski uzunluğuna kavuşur. Düşük gerilmeler altında şekil değiştirmeler elastik, gerilme belirli bir sınırı aşarsa oluşacak şekil değiştirme plastik yani kalıcı şekil değiştirme adı verilir.

Isı etkisi altında kalan bir parçada, meydana gelebilecek her türlü değişikliğin engellenmesi; parçada basma ve çekme gerilmelerine neden olur. Bir malzemenin kalıcı şekil değiştirmeye başladığı gerilme değeri akma dayanımı olarak adlandırılır. Parçada meydana gelen gerilmeler bu değerin altında olursa elastik şekil değişimi ve bu değerin üzerinde olursa plastik şekil değişimi meydana gelir. Elastik şekil değişiminde parçaya uygulanan kuvvet ortadan kalktığında parçada herhangi bir değişiklik olmadan tekrar eski haline döner. Plastik şekil değişiminde ise parçaya uygulanan kuvvet ortadan kalksa bile parçada kalıcı şekil değişikliği meydana gelmiştir. Bu davranış gerilmenin değeri kadar, malzemenin sünek veya gevrek davranışına da bağlıdır.

Kaynaklı imalat ile elde edilen parçalarda oluşan gerilmeler ve ortaya çıkan çarpılmaların nedenleri; ısıl gerilmeler, yapılan imalatın rijitliği ve malzemenin metalurjik özellikleri olarak sıralanabilir.



Şekil 6.1. Elastik şekil değişimi



Şekil 6.2. Plastik şekil değişimi

6.1.1. Isıl Gerilmeler

Sıcaklık değişimleri, malzemelerde genellikle şekil değişimine sebep olur. Sıcaklık arttığında malzemede genleşme artar, sıcaklık azaldığında malzemedeki genleşme azalır ve büzülmeler ortaya çıkar. Bu şekilde meydana gelen şekil değişimi ile birlikte malzemede birtakım gerilmeler meydana gelir. Sıcaklık artışı ile birlikte meydana gelen genleşme ile oluşan gerilmeye ısıl gerilme adı verilir.

Isıl gerilmeler aşağıdaki faktörlere bağlıdır:

1) Sıcaklık farkı
2) Elastik modülü
3) Isıl uzama katsayısı

6.1.1.1. Sıcaklık Farkı

Malzemelerde sıcaklık farkının artmasıyla birlikte, malzemede meydana gelen gerilmeler artmaktadır. Meydana gelen bu gerilmeler plastik şekil değiştirme bölgesinde kısmi gerilme sebebiyle deformasyona sebep olur.

6.1.1.2. Elastiklik Modülü

Malzemenin kuvvet altında gösterdiği karakteristik davranışın ölçüsüdür. Elastik şekil değiştirme de lineer kısmın eğimi, elastiklik modülünü verir. Çekme gerilmesinin birim uzamaya oranıdır. Malzemeden malzemeye göre değişen bir özellik olup, elastiklik modülü büyüdükçe malzeme daha az şekil değişikliği gösterir. Rijitliği artar.

$E=\sigma/\varepsilon$ (Hooke Kanunu)

E= elastisite modülü

σ= gerilme

ε= şekil değiştirme oranı

6.1.1.3. Isıl Uzama Katsayısı

Isıl uzama katsayısının artmasıyla; malzeme üzerindeki basma ve çekme gerilmeleri artmaktadır.

6.2. Distorsiyon Çeşitleri

Kaynak nedeniyle meydana gelen iç gerilmelerden dolayı oluşan ve düzenli olmayan deformasyona distorsiyon adı verilir.

Distorsiyonlar; enine, boyuna, açısal ve iç köşe birleştirmelerinde distorsiyonlar olarak dört kısma ayrılır.

6.2.1. Enine Distorsiyonlar

Soğuma sırasında kaynak metalinin büzülmesi nedeniyle oluşan enine gerilmelerin neden olduğu, parçada kaynak dikişine dik yönde meydana gelen çekmedir. Sıcak kaynak metali soğuk plakalardan daha düşük akma mukavemetine sahip olduğundan deformasyon öncelikle kaynakta gerçekleşir. Ancak soğumanın sonlarına doğru ana

metalde de deformasyon gerçekleşebilir. Bu deformasyon ana metalin genişliğinin azalmasına neden olur.

Alın kaynaklarında oluşan enine distorsiyonların büyüklüğü; kaynak bölgesine verilen ısı miktarı, kaynak ağız genişliği ve kaynak dikişinin uzunluğuna bağlıdır.

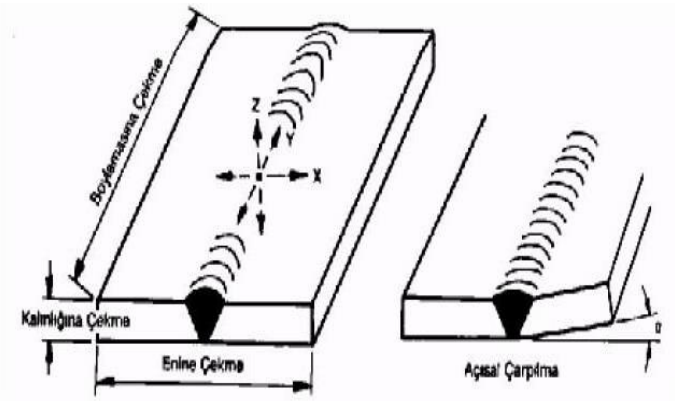
6.2.2. Boyuna Distorsiyonlar

Kaynak metalinin erimesi esnasında, kaynak bölgesine yakın bölgeler genleşmek ister. Isı etkisi altına girmemiş bölgeler ise malzemenin boyundaki değişikliği engeller ve plastik bir yığılma meydana gelir. Bu durum boylamasına distorsiyon ve gerilmelerin meydana gelmesine sebep olur. Distorsiyon miktarı, kaynağın hızı yükseltilerek veya kaynak aralığı artırılarak düşürülebilir.

6.2.3. Açısal Distorsiyonlar

Enine distorsiyonun özel şeklidir. Parçanın ilk durumuna göre kendisini belirli bir miktarda çekmesidir. Kendini çekme, soğuyan metalin uzunluğuna bağlı olduğundan kaynak ağzının üst kısmında daha fazla kendini çekme meydana gelir. Eğer ana metal plakaları tespit edilmemişse açısal distorsiyon oluşur.

Alın dikişlerinde meydana gelen distorsiyon miktarı; kaynak ağzının şekli, pasoların şekli ve sac kalınlığına bağlıdır.



Şekil 6.3. Dikişin oluşum şeklinin distorsiyon üzerine etkisi (Anık, 2011, s.119)

6.2.4. İç Köşe Birleştirmelerinde Distorsiyonlar

6.2.4.1. Enine Distorsiyonlar

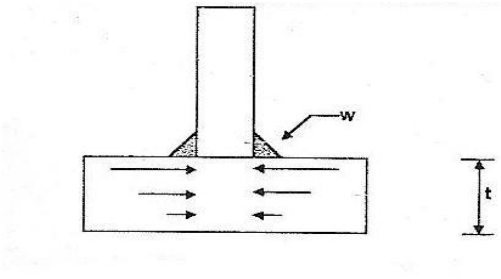
Kaynak bölgesindeki soğuma esnasında kaynak metalinin büzülmesi nedeniyle meydana gelen gerilmelerin oluşturduğu ve kaynak dikişine dik yönde oluşan çekmedir.

6.2.4.2. Boyuna Distorsiyonlar

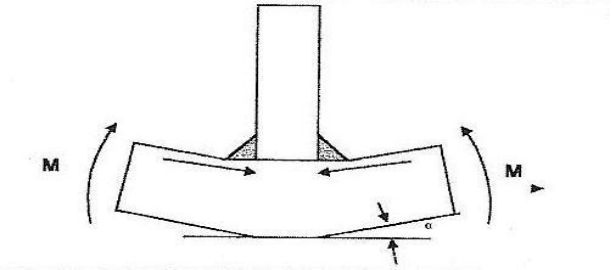
Dikişin içinde oluşan çekme kuvvetleri, konstrüksiyonun rijitliğine zıt bir yönde etki oluşturur. Kirişin boyuna oranı distorsiyonu ifade eder.

6.2.5. Açısal Distorsiyon

Tek taraflı tavlama sonucunda malzemede sıcaklık farkları meydana gelir. Meydana gelen bu sıcaklık farkından dolayı, malzeme kendisini ilk durumuna göre belirli bir açıda çeker. Bu açısal çekme olayına açısal distorsiyon adı verilir. Enine distorsiyonun özel bir halidir. Paso sayısının ve sac levhaları arasındaki mesafenin artması, distorsiyonu arttırır. Zıt yönde açı oluşturularak distorsiyon engellenebilir.



Şekil 6.4. T birleşiminde artık gerilme dağılımı (Altan, 2002)

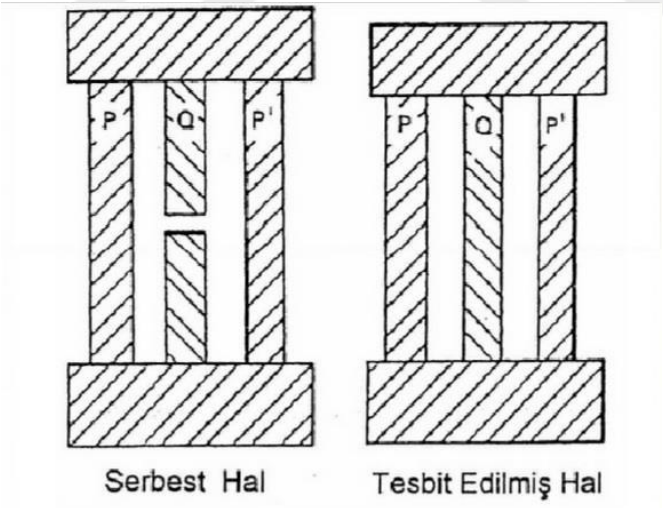


Şekil 6.5. T birleşiminde açısal distorsiyon (Altan, 2002)

6.3. Kaynak Artık Gerilmeleri

Büzülmelerin sınırlanması halinde kaynak artık gerilmeleri oluşur. Engellenmiş şekil değiştirme kabiliyetinin farklı nedenleri vardır.

6.3.1. Yapı Elemanının Dış Gerilmeleri

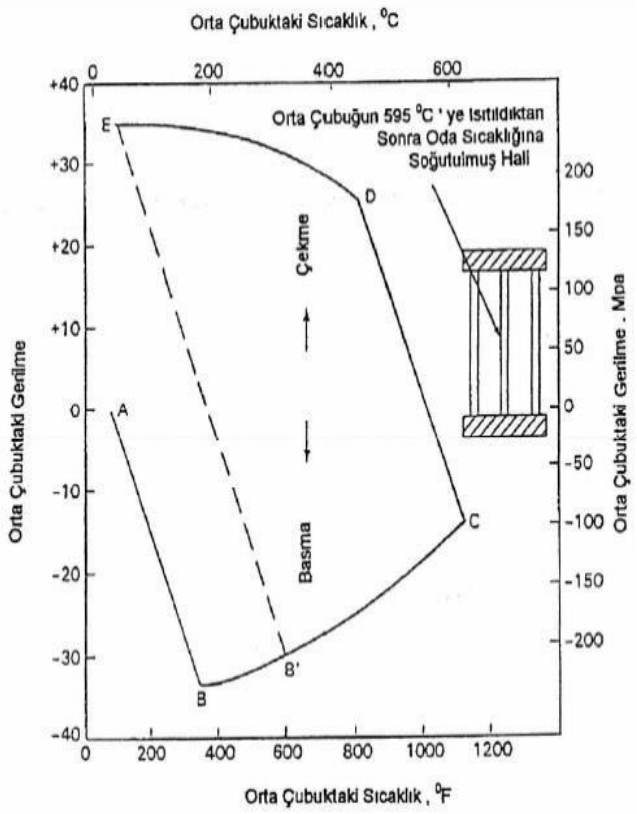


Şekil 6.6. Farklı uzunluktaki çubukların uç kısımlarından

birleştirilmeleri ile meydana gelen artık gerilmeler (Benli, 2004)

Bir metalurjik faz dönüşümü olduğunda, malzemenin genişlemesi veya daralması sonucu ilk ve son faz arasındaki hacim farklılıkları nedeni ile artık gerilmeler meydana

gelir. Yüksek bir sıcaklıkta soğutma sırasında, metal dış kısımları birinci soğuk faza dönüşüm geçirir. Yeni fazın hacmi başlangıçtaki hacimden büyükse, metalin hacmi artmış olur. Metali soğutarak hacminin artırılması amaçlanır. Ancak hacim büyüdükçe dış tabaka tarafından kısıtlanır. Sonuç olarak bileşenin orta kısmında sıkıştırma olacak ve dış yüzey gerilimi artacaktır.



Şekil 6.7. Tespit edilmiş çubuğun ısıtılmasının artık gerilme üzerine etkisi (Benli, 2004)

Yeni fazın hacmi, başlangıç aşamasındaki hacimden daha küçük olduğu zaman tam tersi gerçekleşir. Bileşenin orta kısmı gerilim altında olacak ve yüzeyde sıkıştırma olacaktır.

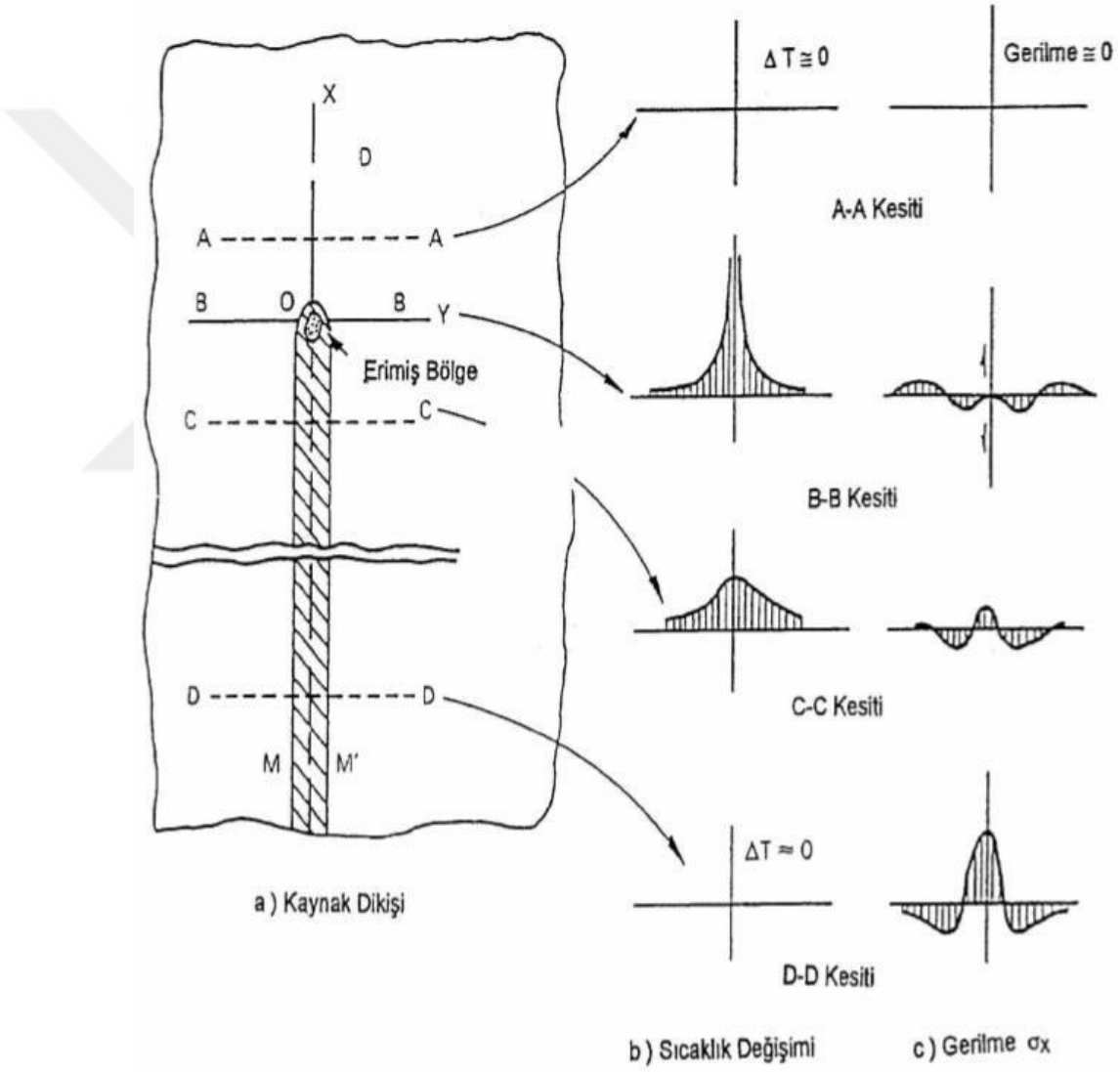
Ferrit ve perlit aşamasındaki geçişler normalde sadece kalıntı gerilmelere neden olur, çünkü çeliğin akma dayanımındaki sıcaklık aralığında, gerilmeleri oluşturan çok düşük plastik deformasyonlar geri alınabilir.

Beynit ve martenzit geçişlerde durum böyle değildir. A durumunda östenit hacimde artışa neden olur. Homojen halinde geçişte, basınç gerilmesi sebebiyle kaynak açılacak. Kenar alanlarındaki geçiş ortadaki soğumadan önce gerçekleşirse orta alandaki plastik

deformasyon kenardan ortaya bastırma şeklinde olabilir. Bu durumda kaynak yüzeyleri soğuduktan sonra çekme yüklemeleri gösterir.

Genellikle bu mekanizmalar birbirinden doğru ayrılamazlar, 4. şekilde gösterildiği gibi, bu şekilde artık gerilmeler üst üste gelir. Farklı mekanizmaların örtüşmesi, farklı gerilmelerin durumlarının tahmin edilmesini zorlaştırır.

Şekil 6.7, şekil 6.6' daki 3 çubuklu modelin kaynak dikişindeki çapraz gerilmeleri göstermektedir.



Şekil 6.8. Sıcaklık ve gerilme dağılımı (Benli, 2004)

Kaynak yapılmadan önce, dikiş yerinde gerilmeler sıfırdır. B-B kesitindeki yüksek sıcaklıktaki kaynak arkı kaynağı dolduramaz çünkü metal sıvıdır. Bu noktada artık gerilmeler yoktur. Çünkü eriyik metal yük taşıyamaz. Isının etkisinde kalan bölgedeki gerilmeler bası gerilmeleridir çünkü etrafındaki metallerin sıcaklığının düşük olması bu bölgenin genleşmesini engeller.

BÖLÜM 7

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ VE ANSYS PROGRAMI

7.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi

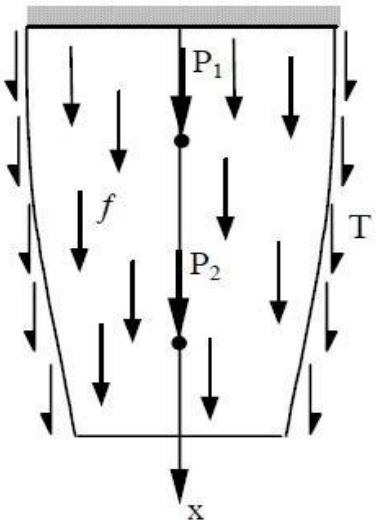
Sonlu elemanlar yöntemi; karmaşık olan problemleri çok küçük alt problemlere ayırıp, bunları kendi içerisinde çözerek tam çözüme ulaşılan bir metottur. Metodun üç temel niteliği vardır: İlk olarak geometriyi daha basit ve hassas bir şekilde çözümleyebilmek için, çözüm bölgesini sonlu elemanlar olarak adlandırılan yöntem kullanılarak geometrisi daha basit alt bölgelere ayırır. Bu işleme meşleme (meshing) adı verilir. İkincisi her elemandaki sürekli fonksiyonlar, cebirsel polinomların lineer kombinasyonu olarak tanımlanabileceği kabul edilir. Üçüncü kabul ise, aranan değerlerin her elemanın içerisinde sürekli olarak tanımlanmış denklemlerin belirlenen noktalarda problemin çözümü için yeterli olmasıdır. Kullanılan yaklaşım fonksiyonları interpolasyon teorisinin genel kavramları kullanılarak polinomlardan seçilir. Seçilen polinomların derecesi ise çözülmesi istenen problemin tanım denkleminin derecesine ve çözümü yapılacak problemde belirlenmiş olan elemanlarındaki düğüm sayılarına bağlıdır.

Sonlu elemanlar yönteminin kullanılması ve bilgisayarların sanayiye girmesiyle, bir çok tasarımın, üretimi yapılacak olan makine elemanının incelenmesi kolaylaşmış, daha çizim aşamasında iken tüm mukavemet analizlerinin yapılması kolaylaşmış, önceden sadece deneysel olarak yapılabilen çalışmalar bilgisayar teknolojisi kullanılarak pratiklik kazanmış, hem vakit kaybı giderilmiş hem de malzemenin üretimi yapılmadan önce malzemeden istenilen tüm değerler önceden belirlenip üretimin daha optimum şartlarda yapılması mümkün olabilmiştir.

7.2. Sonlu Eleman Sisteminin Modelinin Oluşturulması

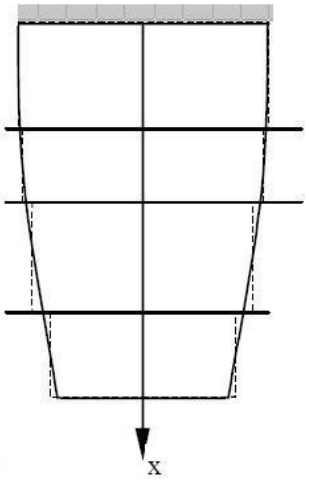
7.2.1. Modeli Elemanlara Ayırma

Şekil 7.1’ deki çubuğu inceleyecek olursak;



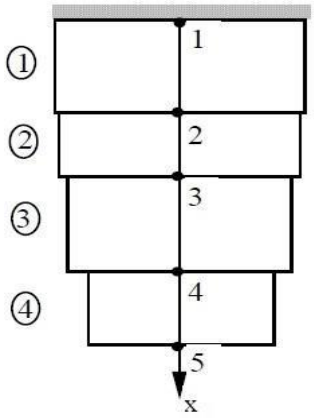
Şekil 7.1. Sabit kesitli çubuk

Sonlu elemanlarda modelin oluşturulmasında ilk önce, çubuk belirli sayıda sabit kesitli elemanlardan meydana gelmiş kademeli çubuk olarak ele alınır. Burada çubuk, dört ayrı eleman olabilecek şekilde modellendi. Model çubuk, dört ayrı bölgeye ayrıldı.



Şekil 7.2. Elemanlara bölünmüş model

Şekil 7.3'de dört eleman ve beş düğümden oluşmuş bir sonlu eleman modeli görülmektedir.



Şekil 7.3. Eleman ve düğümlere ayrılmış model

Sonlu elemanlar modelinde bütün elemanlar düğüm noktalarından birbirine bağlı olarak düşünülür. Eleman sayıları artırılarak daha iyi ve daha hassas sonuçlar elde edilebilir. Tekil yüklerin uygulanmış olduğu noktaların düğüm noktası olarak seçilmesi gerekir.

7.3. Kaynak İşleminin Modellenmesi

7.3.1. Termal Model Analizi

Isı iletim çözümlemesinde asıl amaç, verilen sınır koşulları için bir ortamda sıcaklık dağılımı belirlemektir. Bu dağılım bilindiğinde, ortam içinde veya yüzeyinde herhangi bir noktadaki iletimle ısı akısı Fourier yasasından hesaplanabilir. Bir katı için sıcaklık dağılımı bilgisi, ısıl gerilmeler, genleşme ve yer değiştirmelerin belirlenmesi ile yapısal bütünlüğün belirlenmesinde kullanılabilir.

İçinde kütlesel bir hareket olmayan ve T (x, y, z) sıcaklık dağılımının kartezyen eksen takımında gösterildiği homojen bir ortam ele alınsın. Enerji korunumu uygulanarak, sonsuz küçük bir kontrol hacmi dx, dy, dz olarak tanımlanır. İkinci adım, sıcaklık gradyanlarıyla kontrol yüzeylerinin her biri üzerindeki iletimle ısı geçişini ele almak olacaktır. Yüzeylere etki eden ısı iletimi sırasıyla q_x, q_y ve q_z terimleri ile ifade edilir. Denklemde yerine koyarak,

Isı iletimi Fourier yasası ile;

$$q_x = -k\,dy\,dz\,\frac{\partial \square}{\partial \square} \quad \text{..... (7.1)}$$

$$q_y = -k\,dx\,dz\,\frac{\partial \square}{\partial \square} \quad \text{.....(7.2)}$$

$$q_z = -k\,dx\,dy\,\frac{\partial \square}{\partial \square} \quad \text{.....(7.3)}$$

Geçen ısıyı elde etmek için her bir ısı akısı bileşeni uygun kontrol yüzey alanı ile çarpılmıştır. Denklem, denklemde yerine konur ve kontrol hacmi (dx, dy, dz) ile bölünürse

$$\frac{\square}{\partial \square}\left(k\,\frac{\partial \square}{\partial \square}\right) + \frac{\square}{\partial \square}\left(k\,\frac{\partial \square}{\partial \square}\right) + \frac{\square}{\partial \square}\left(k\,\frac{\partial \square}{\partial \square}\right) + q' = \square\square\frac{\partial \square}{\partial \square} \quad \text{.....(7.4)}$$

Denklem ısı yayılım denkleminin kartezyen eksen takımındaki genel biçimidir.

Burada;

k: Isı iletim katsayısı

ρ: Yoğunluk

Cp: Özgül ısı

t: zaman

Model, Fourier ısı akış denklemi de dikkate alınarak tamamlanır:

$$R_x = -k_x\frac{\partial \square}{\partial \square} \quad \text{.....(7.5)}$$

$$R_y = -k_y\frac{\partial \square}{\partial \square} \quad \text{.....(7.6)}$$

$$R_z = -k_z\frac{\partial \square}{\partial \square} \quad \text{.....(7.7)}$$

k_x, k_y, k_z, eksenlerdeki ısıl iletkenlikleri ifade etmektedir. k_x, k_y, k_z, ρ ve C_p parametreleri ısının bir fonksiyonu olup, 7.8 no'lu denklemde yerine koyarsak;

$$\frac{\square}{\partial \square}\left(-k_x\frac{\partial \square}{\partial \square}\right) + \frac{\square}{\partial \square}\left(-k_y\frac{\partial \square}{\partial \square}\right) + \frac{\square}{\partial \square}\left(-k_z\frac{\partial \square}{\partial \square}\right) + Q = \rho\,C_p\frac{\partial \square}{\partial \square} \quad \text{..... (7.8)}$$

7.8 no'lu denklem ısı iletiminin katı modele dönüştürüldüğü bir denklemdir. Başlangıç şartları ve sınır şartı göz önüne alınarak işlem yapıldığında;

Başlangıç şartı: $T(x, y, z,0) = T_0(x, y, z)$

Sınır şartı:

$$(k_x \frac{\partial T}{\partial x} + k_y \frac{\partial T}{\partial y} + k_y \frac{\partial T}{\partial y}) + q_s + h_c (T-T_\infty) + h_r (T-T_r) = 0 \quad \text{.....(7.9)}$$

N_x, N_y, N_z: sınıra normali çizilen harici kosinüs

h_c : konveksiyon ile ısı transfer katsayısı

h_r : radyasyon ile ısı transfer katsayısı

q_s: sınır ısı akışı

T_∞: çevre sıcaklığı

T_r: radyasyon ısı kaynağı sıcaklığını tanımlamaktadır.

7.3.2 Mekanik Model Analizi

İki tane temel denklem vardır. Bunlar, yapı denklemleri ve denge denklemleridir.

Denge denklemleri;

$$\sigma_{ij} + \rho b_i = 0 \quad \text{.....(7.10)}$$

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji} \quad \text{..... (7.11)}$$

σ_{ij}: gerilme

b_i: kütle kuvveti

7.3.2.1. Yapı Denklemleri (Termal Elasto-Plastik Malzemeler)

Termal elasto-plastik malzeme modeli, Von Mises kriteri ile hem elastik hem de plastik davranış gösteren malzeme yapısına sahiptir. Gerilme-uzama ilişkileri;

$$[d\sigma] = [D^{ep}][d\varepsilon] - [C^{th}]dT \quad \text{..... (7.12)}$$

$$[D^{ep}] = [D^e] + [D^p] \quad \text{.....(7.13)}$$

$[D^e]$: elastik rijitlik matrisi

$[D^p]$: plastik rijitlik matrisi

$[C^{th}]$: termal rijitlik matrisi

dσ: gerilme artışı

dƐ: uzama artışı

dT: sıcaklık artışını ifade eder.

Termo elasto-plastik malzemenin analizi, non-lineer bir problem olduğundan dolayı, burada artan hesaplama metodundan yararlanılır ve artan gerilim Newton-Raphson yöntemi ile bulunur.

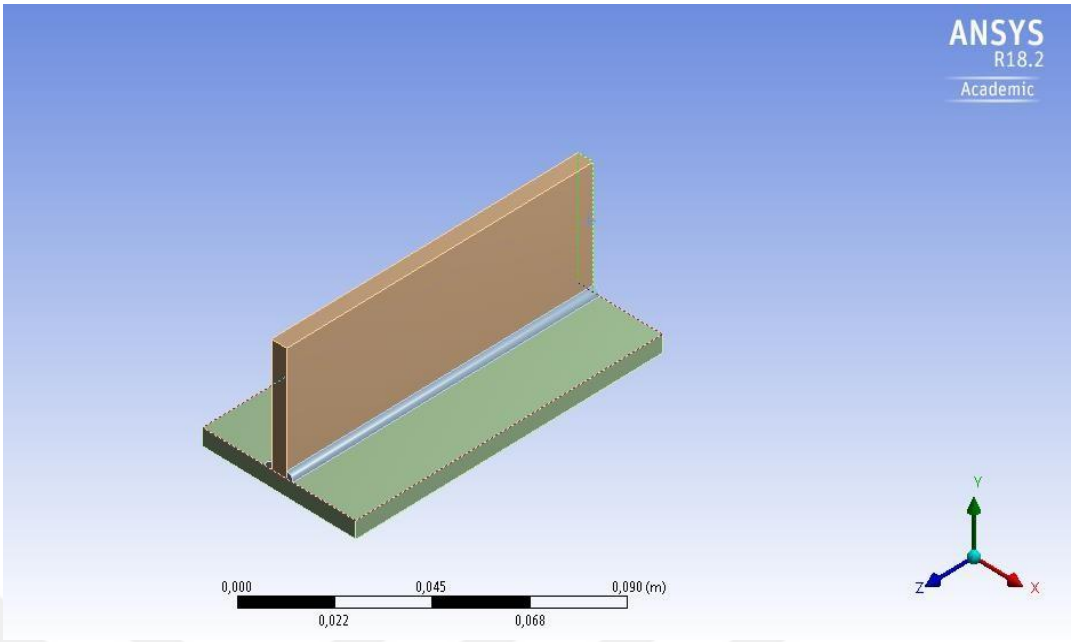
7.4. Kaynak İşleminin Sonlu Elemanlar Programı ile Analizi

Sanayide kullanılan en yaygın katı modelleme programları Solidworks, Pro-Engineer, Catia vb. programlardır. Bu tür katı modelleme programlarının yanında analiz yapılabilmesi için kullanılan paket programlar da mevcuttur. ANSYS genel amaçlı olarak kullanılan sonlu elemanlar paket programıdır. ANSYS gibi ABAQUS, IDEAS, ADAMS, LUCAS vb. paket analiz programları, kullanılan programlardan bazılarıdır. ANSYS mekanik problemler için kullanılır ve yapısal analizler (lineer veya non-lineer), ısıl analizler (steady-state, transient thermal), akış analizleri (CFD) içerir.

7.4.1. Problemin Tanımı

Bu çalışmada kaynaklı birleştirme yöntemlerinden biri olan ark kaynağı ile birleştirme yöntemi kullanılarak, meydana gelen artık gerilmeler ANSYS sonlu elemanlar programı kullanılarak analizi yapılmıştır.

Parça 3D boyutlu olarak tasarlanarak, kaynağın elektrik ark kaynağı yöntemi ile tek seferde yapıldığı kabul edilmiştir.

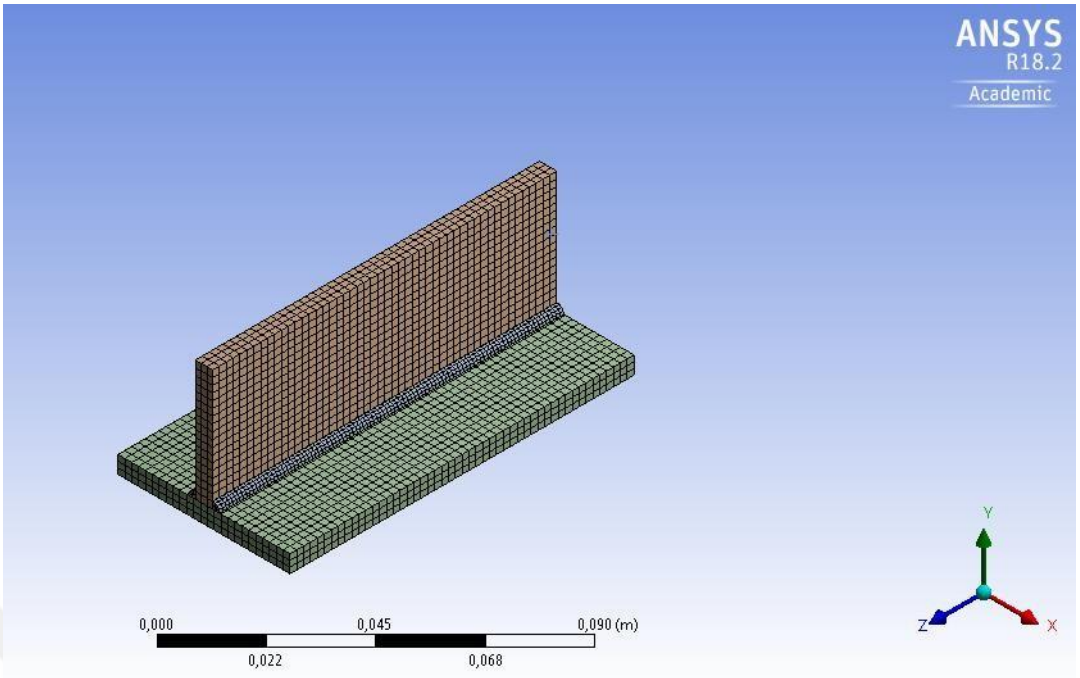


Şekil 7.4. Parçanın üç boyutlu modeli

Parça Solidworks programında çizimi yapılarak Ansys Workbench programına aktarılmıştır. Öncelikle malzememizin zamana bağlı sıcaklık değişimini inceleyebilmek için (Transient Thermal Analysis) malzemede ısıl analiz yapılmıştır. Kaynakla birleştirilecek her iki sacımızın malzeme türü AISI 304 paslanmaz çelik saçtır. Malzememiz öncelikle en küçük elemanlara ayırabilmek için meşleme (meshing) işlemi yapılmıştır.

7.4.2. Termal Analiz (Zamana Bağlı Olarak Yapılan Isıl Analiz)

Hem sac malzemesi hem de kaynak metali ayrı ayrı elemanlara bölünerek meşleme (meshing) gerçekleştirilmiştir. Meşleme (meshing) işleminde malzememiz 16592 düğüm noktası ve 2872 elemana ayrılmıştır.



Şekil 7.5. Modelimizin meşleme (meshing) işlemi yapıldıktan sonraki görünüşü

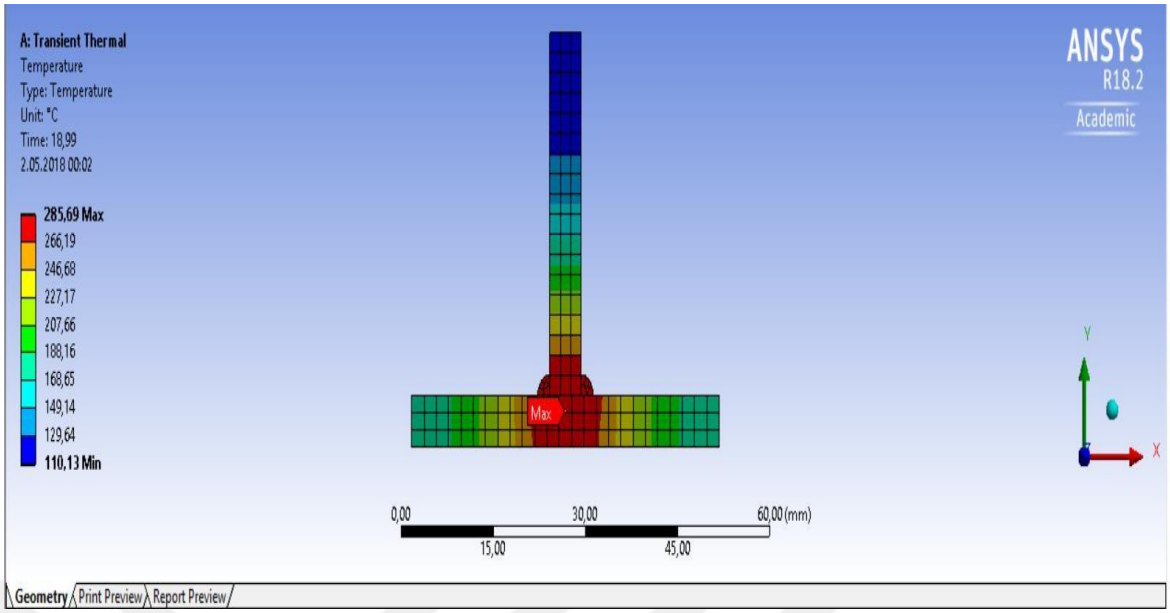
Meşleme (meshing) işleminin çok hassas olması gerekir. Malzeme öncelikle her biri kendi içinde analiz edilecek birim elemanlara ayrılır. Bu birim elemanlar kullandığımız sonlu elemanlar paket programında element (eleman) olarak isimlendirilmiştir. Modelimizin elemanlara bölünmüş olarak hali Şekil 7.5' de verilmiştir.

Modelimizin meşleme (meshing) işlemi bittikten sonra daha önce sisteme girilmiş olan malzeme mekanik özellikleri analizde seçilir. Modelimiz AISI 304 paslanmaz çelik sac olarak belirlenmiş olup sıcaklığa bağlı fiziksel ve mekanik özellikler tabloda verilmiştir.

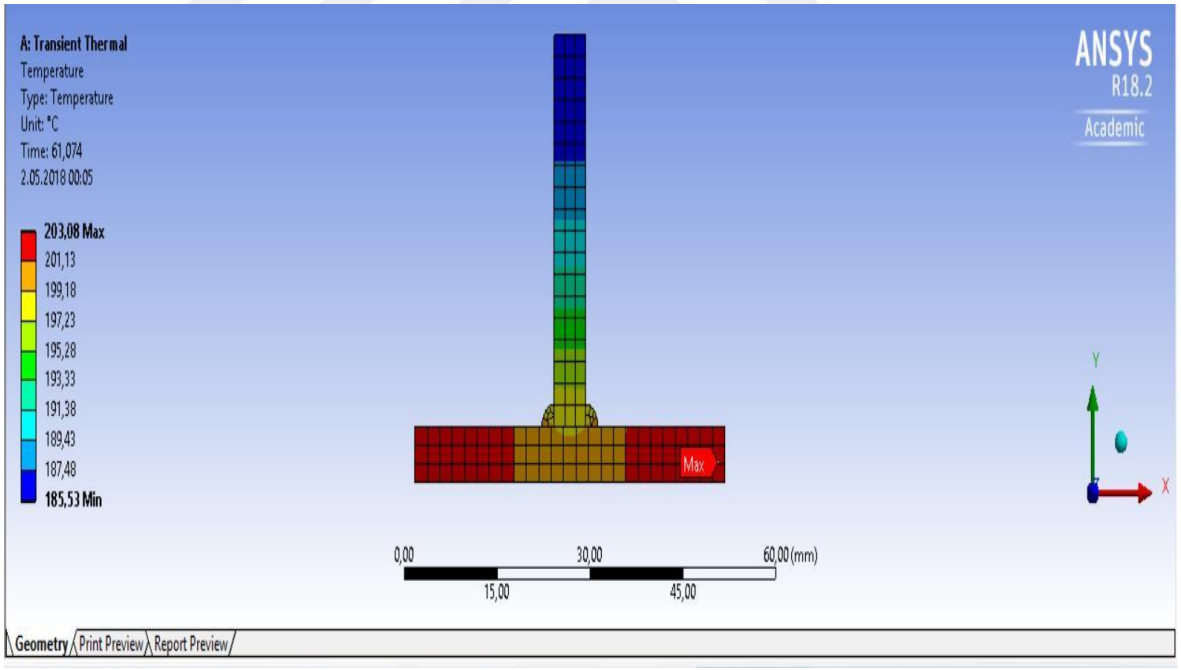
Çizelge 7.1. AISI 304 çeliğin sıcaklığa bağlı fiziksel ve mekanik özellikleri (Dean Deng, Hidekazu Murakava, 2005)

Sıcaklık (ºC)	Öz ısı (J/g ºC)	İletkenlik (J/mm ºC s)	Yoğunluk (g/mm^3)	Akma gerilmesi (MPa)	Isıl genleşme kats. ($ºC^{-1}$)	Young's modülü (GPa)	Poisson oranı
0	0,462	0,0146	0,79	265	1,70e-5	198,5	0,294
100	0,496	0,0151	0,788	218	1,74e-5	193	0,295
200	0,512	0,0161	0,783	186	1,80e-5	185	0,301
300	0,525	0,0179	0,779	170	1,86e-5	176	0,310
400	0,540	0,0180	0,775	155	1,91e-5	167	0,318
600	0,577	0,0208	0,766	149	1,96e-5	159	0,326
800	0,604	0,0239	0,756	91	2,02e-5	151	0,333
1200	0,676	0,0322	0,737	25	2,07e-5	60	0,339
1300	0,692	0,0337	0,732	21	2,11e-5	20	0,342
1500	0,700	0,120	0,732	10	2,16e-5	10	0,388

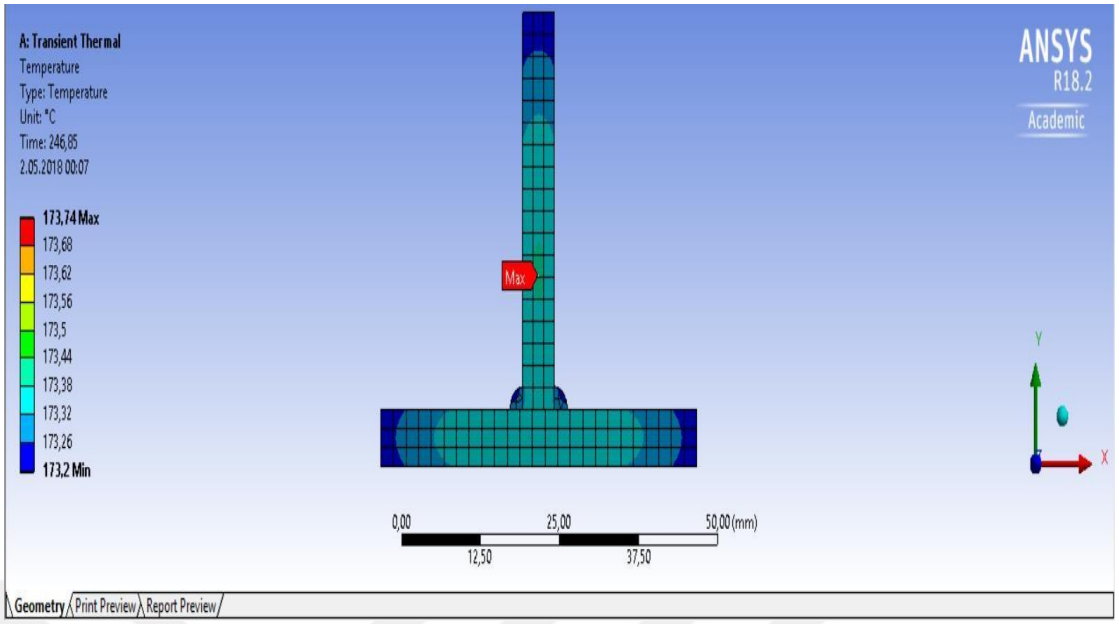
Analiz için başlangıç sınır şartımız sac metali için 25˚C ve kaynak metali için ise 1500˚C olarak belirlenmiştir. Başlangıç sınır şartları sisteme girildikten sonra analiz çözdürülerek çeşitli zamanlardaki ısıl durum veri tabanına kaydedilir.



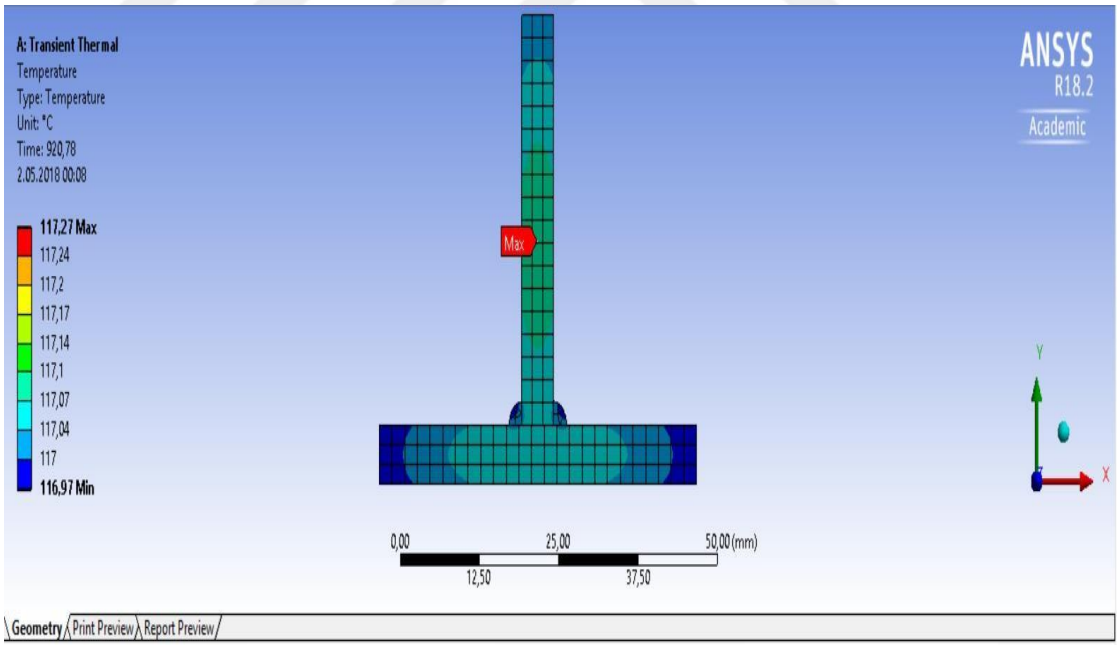
Şekil 7.6. Kaynaktan yaklaşık 20 sn. sonraki sıcaklık durumu



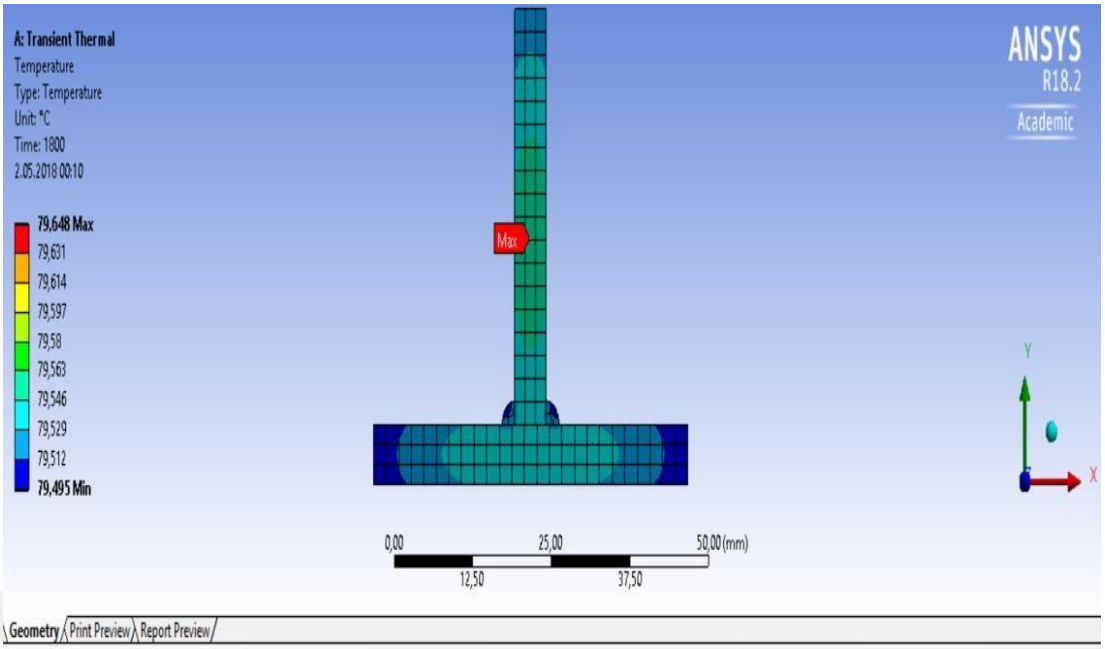
Şekil 7.7. Kaynaktan yaklaşık 1 dk. sonraki sıcaklık durumu



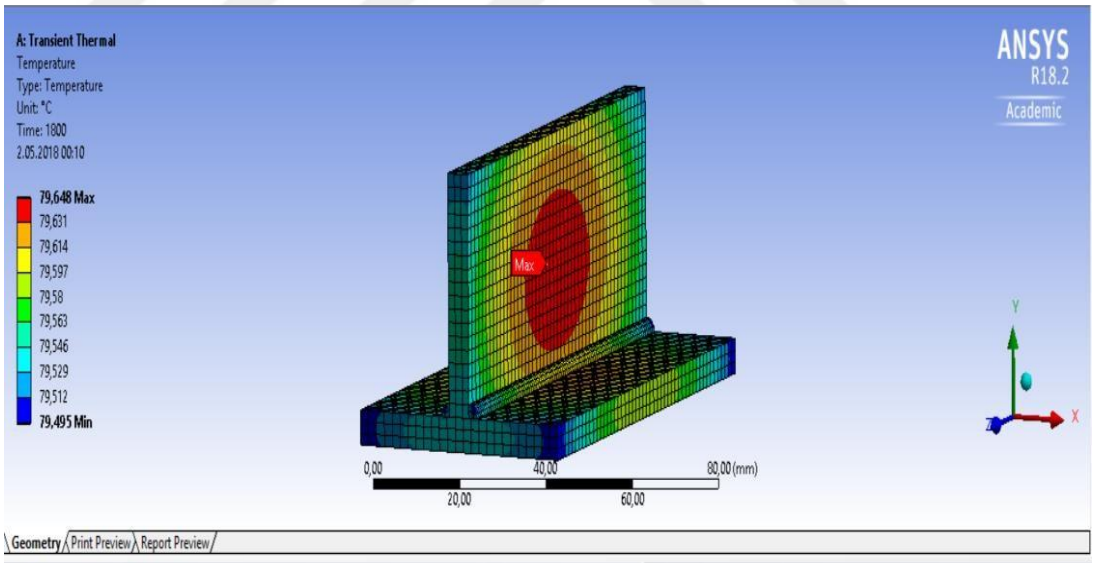
Şekil 7.8. Kaynaktan yaklaşık 4 dk. sonraki sıcaklık durumu



Şekil 7.9. Kaynaktan yaklaşık 15 dk. sonraki sıcaklık durumu



Şekil 7.10. Kaynaktan 30 dk. sonraki sıcaklık durumu



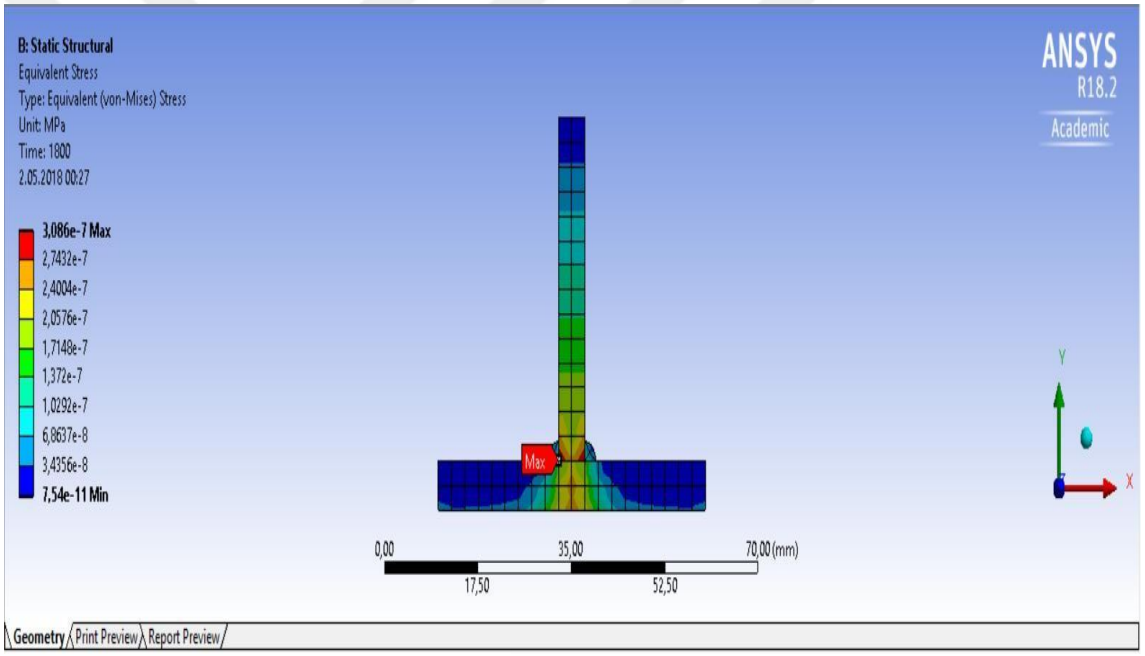
Şekil 7.11. Kaynaktan 30 dk. sonra parçada sıcaklık dağılımı

Şekil 7.12'de de görüldüğü gibi malzememiz kaynaktan 30 dakika sonra homojen denge sıcaklığı dağılımına ulaşmıştır. Şekilde de görüleceği gibi 30 dakikalık bir süre zarfında kaynak bölgesi sıcaklık değeri ile analiz sonucunda programın kaynağın en

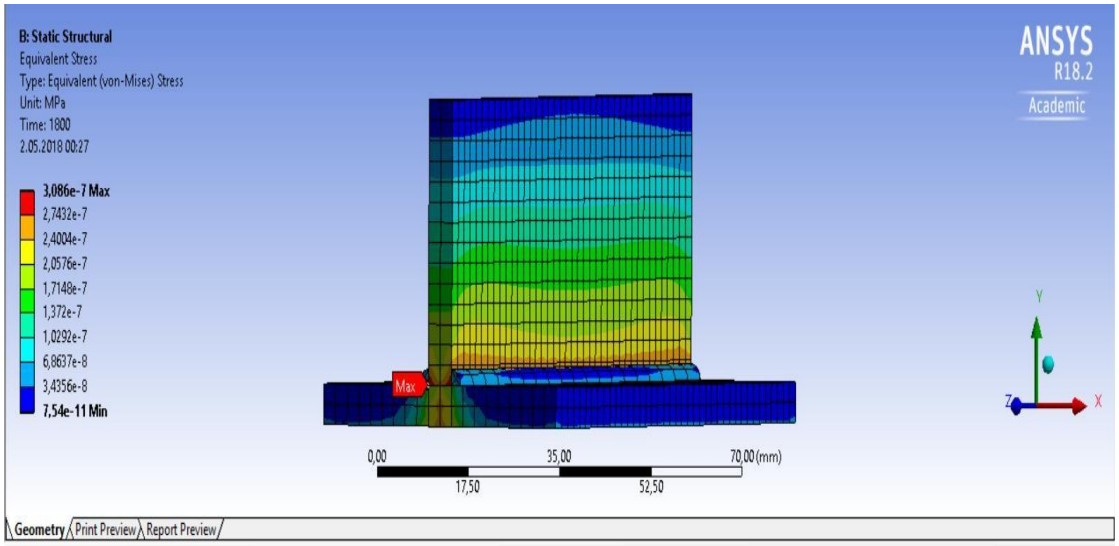
yoğun olarak gösterdiği sıcaklık bölgesindeki değerler arasında 0,1 ºC gibi çok küçük bir değer ortaya çıkmıştır.

7.4.3. Yapısal Analiz

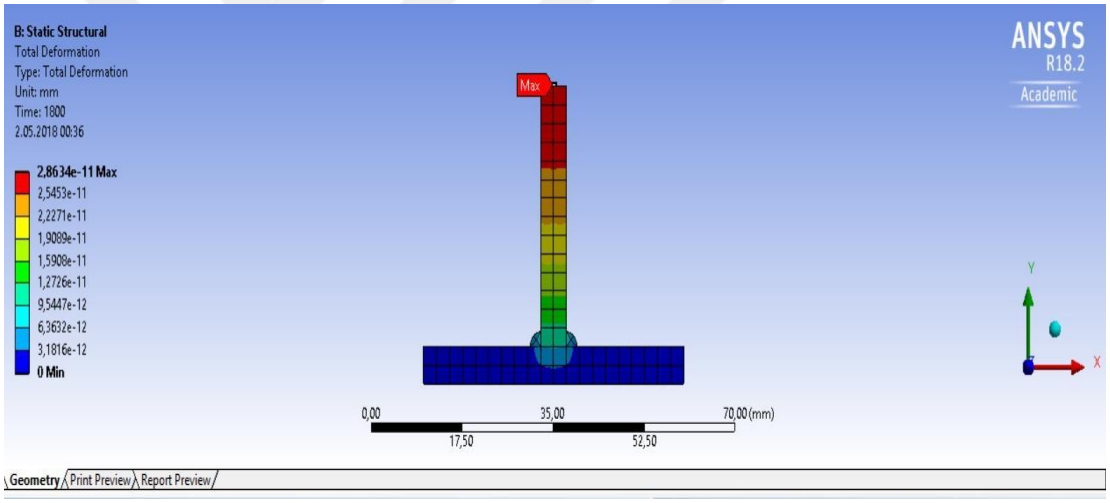
Parçamızda termal analiz yapıldıktan sonra, termal analizde aldığımız sonuçlar yapısal analizde kullanılmak üzere alınarak yapısal analiz uygulanmıştır. Kaynak bölgesi ile birlikte malzememiz denge sıcaklığına ulaştıktan sonra, y ekseni yönünde deplasman uygulanarak kaynak bölgesindeki plastik deformasyon bölgeleri von mises kriterine göre incelenmiştir.



Şekil 7.12. X ekseni yönündeki artık gerilmelerin dağılımı



Şekil 7.13. Y ekseni yönündeki artık gerilmelerin dağılımı



Şekil 7.14. Parçada meydana gelen toplam deformasyon hali

Analiz tamamlandıktan sonra Şekil 7.14'de görüldüğü üzere malzememizde oluşan toplam deformasyon $2{,}8634 \times 10^{-11}$ mm. olarak hesaplanmıştır ki, gözle görülebilmesi çok zor bir deformasyon miktarıdır.

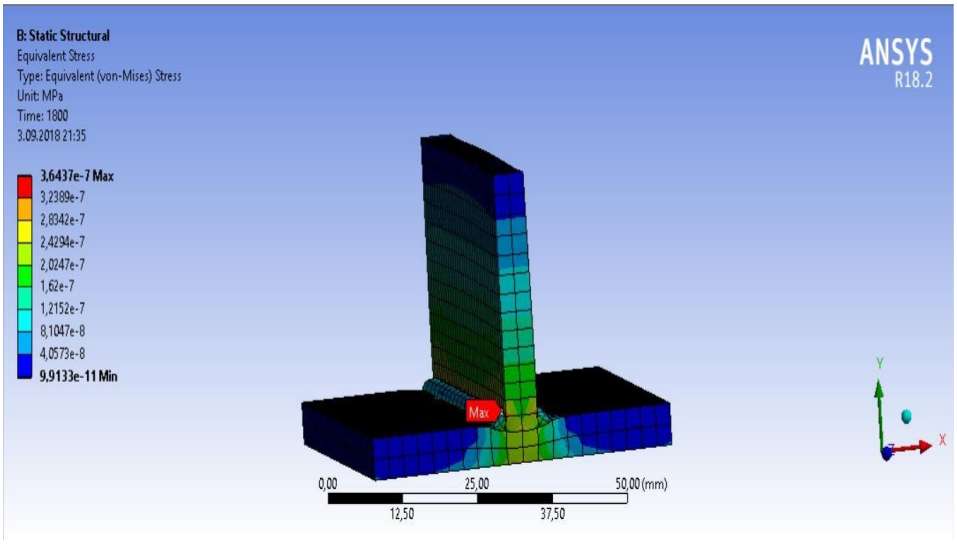
BÖLÜM 8

SONUÇ

8.1. Sonuç

Malzeme birleştirmede kullanılan en önemli yöntemlerden biri de kaynaktır. Çok çeşitli kaynaklı birleştirme yöntemleri mevcuttur. Yapılacak herhangi bir kaynak işleminde oluşabilecek hatalardan doğabilecek sorunlar, kaynak işlemi yapılmadan analiz programları ile çalışmalar yaparak tespit edilebilir hale gelmiştir. Bu yüzden yaptığımız bu kaynaklı imalat analizinde, kullanılan malzeme ve sınır şartlarına göre yapılabilecek olan herhangi bir deneysel çalışmadan önce karşılaşılabilecek sorunların önceden görülmesi öngörülmüştür.

Kaynak işlemi yaptığımız parçamızda, AISI 304 paslanmaz çelik malzeme seçilerek, girilen sınır koşullarında yapılacak olan kaynakta malzemenin vereceği tepki araştırılmış, saclarda yapılacak olan kaynak işleminden önce, saclarda ve kaynak metali içinde ortaya çıkacak artık gerilmelerin ve meydana gelebilecek distorsiyonların incelenmesi amaçlanmıştır. Öncelikle her iki sac ve kaynak metali üzerindeki sıcaklık dağılımları incelenmiştir. Sıcaklık dağılımının incelenmesi için ısıl analiz yöntemi uygulanmıştır. Sıcaklık homojen dengeye ulaşmaya başladığında, sıcaklığın y ekseni boyunca ilerlediği ve en yoğun sıcaklığın üst sacın kaynak bölgesine yakın yerinde olduğu görülmektedir. Isıl analiz yöntemiyle parçada meydana gelen sıcaklık dağılımı verileri kullanılarak statik analize geçilmiştir. Yapılan statik analiz incelemesinde parçada meydana gelen artık gerilmeler, parça üzerinde detaylı bir şekilde görülebilmektedir. Kaynak bölgesinden y ekseni boyunca gerilmeler, parça üzerinde dağılmıştır. Gerilmenin en yoğun olduğu kısmın kaynak bölgesi çevresi olduğu görülebilmektedir. Parçada kaynaktan sonra ortaya çıkan ve malzemenin güvenliğini tehdit eden deformasyon gerilmeleri, kaynağın yapıldığı bölgeden itibaren parçaya doğru yayılmaya başladığı görülmüştür. Parçada kaynak bölgesinde oluşan gerilme Şekil 8.1.'de 3,6437e-7 MPa olarak görülmüştür.



Şekil 8.1. Parçadaki artık gerilme dağılımı

Artık gerilmeler, malzeme işlenebilirliğinde karşımıza çıkan en önemli problemdir. Günümüzde ileri mühendislik teknolojileri ile birlikte bu deformasyon ortaya çıkarılabilip, en az seviyeye indirgemek mümkün olabilmiştir. Çalışmamız 30 dakika süre ile yapılan kaynak işlemi ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada oluşan artık gerilmelerin en aza indirilebilmesi için sürenin uzatılması ve verilen sıcaklığın yükseltilmesi gerekecektir. Sürenin kısa tutulması, oluşabilecek ısıl gerilmelerin büyüklüğünü artıracaktır.

Kaynak işlemi, metal malzemeleri için kullanılan en önemli birleştirme yöntemidir. Bir basınçlı kap imalatı, iki sacın birbiri ile birleştirilmesi, tekstil fabrikalarında kullanılan makinelerin imalatı, otomotiv sektörü vb. birçok yerde kaynak teknolojisinden yararlanılır. Kaynak işlemi, çok basit kaynatılacak malzemeden en hassas kaynağa kadar çok dikkat edilmesi gereken bir işlemdir.

Yapılan bu çalışmada da görülmektedir ki, kaynak teknolojisi kullanılan her türlü malzeme birleştirmesinde bu tür gerilmeler ortaya çıkabilmekte ve distorsiyon sorunu yaşanabilmektedir. Bu tür sorunlarla karşılaşmamak ve gerekli önlemlerin alınabilmesi için yapılacak olan tasarımların önceden analizinin yapılarak varsa karşılaşılacak sorunlar için çözüm bulmak en doğru yol olacaktır.

Bu çalışma için kullanılan ANSYS programı, her türlü makine elemanları ve malzeme için kullanılan bir analiz programıdır. Statik gerilmeden, titreşim, çarpışma, ısıl gerilmeler gibi birçok analiz tipleri mevcuttur. Program, yapılacak olan çalışma ile ilgili gerekli tüm dataları alarak, verilen sınır koşullarında oluşabilecek tüm parametreleri hesaplar ve gerçeğe yakın bir simülasyon yaparak malzeme üzerinde oluşabilecek tüm gerilme, gerinim, hasar vb. durumları net bir şekilde gösterir.

KAYNAKÇA

ALTAN M. (2002), *Kaynak Distorsiyonları ve Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi Yüksek Lisans Tezi.* İstanbul:İTÜ

ANIK S. (1983). *Kaynak Tekniği El Kitabı*. İstanbul:Ergör.

ANSYS INC. (2013). *ANSYS Mechanical APDL Thermal Analysis Guide*. Canonsburg: SAS IP,Inc.

BENLİ S. (2004). *Kaynaklı Parçalarda Oluşan Artık Gerilmelerin İncelenmesi Yüksek Lisans Tezi.* İzmir: DEÜ

CARY H.B. (1998). *Modern Welding Technology*. New Jersey: Prentice Hall

ÇELİK S. , *Kaynak Metalürjisi Ders Notları.* Balıkesir: Balıkesir Üniversitesi Makine Bölümü

DENG D., MURAKAVA H. (2005), Numerical Simulation of Temperature Field and Residual Stress in Multi-Pass Welds in Stainless Steel Pipe and Comparison with Experimental Measurements doi: 10.1016/j.commatsci.2005.07.007

ERTÜRK İ., DURUKAN T., ŞENTÜRK B. (2017). *Çeliklerin Kaynağında Isıdan Etkilenen Bölgenin Mikro Yapı ve Özelliklerinin Tahmini*

INCROPERA F.P. , DEWITT D.P. (2000). *Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri Ders Kitabı.*(4. Baskı) İstanbul: Literatür

KOU S. (2002). *Welding Metallurgy* (2. Baskı). New Jersey: Wiley Interscience

LANCASTER J.F. (1993). *Metallurgy of Welding*. London: Chapman &Hall

SLV München & ODTÜ – KTM (2009). *Uluslararası Kaynak Mühendisliği Kurs Notları*. Ankara:ODTÜ Kaynak Teknoloji Merkezi

TSAI C.L., HONG J.K., DONG P. (1998). *Assesment of Numerical Procedures for Residual Stres Analysis of Multipass Welds*

https://slideplayer.biz.tr/slide/2953405/

https://abs.cu.edu.tr/Dokumanlar/2015/JS%20307/373795728_malzemelerin_mekanik_ozellikleri_compatibility_mode.pdf

ÖZGEÇMİŞ

Hasan İlker ÇELİKER, 20.09.1987 tarihinde Tekirdağ'da doğdu. İlk ve ortaöğrenimi Tekirdağ İnönü İlköğretim Okulu'nda, lise öğrenimini Tekirdağ Namık Kemal Lisesi'nde tamamladı. Aksaray Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünden 2011 yılında mezun oldu. Evlidir.