

170751



**TANE BOYUTUNUN HMK KAFESLİ METALLERİN
TEMEL MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Rıza KARA**

**Danışman
Prof. Dr. Galip SAİD**

METAL EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

Ağustos 2005

T.C.
AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TANE BOYUTUNUN HMK KAFESLİ METALLERİN TEMEL
MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

Rıza KARA

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Metal Eğitimi Anabilim Dalı

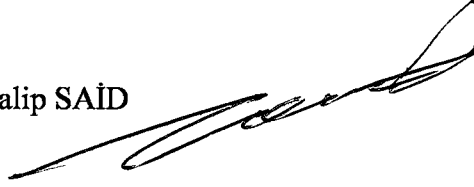
Danışman
Prof. Dr. Galip SAİD

Afyon
2005

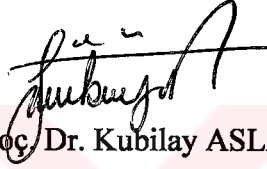
Rıza KARA' nın yüksek lisans tezi olarak hazırladığı "Tane Boyutunun HMK Kafesli Metallerin Temel Mekanik Özelliklerine Etkisi" başlıklı bu çalışma, lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddesi uyarınca değerlendirilerek oy birliği ile kabul edilmiştir.

25 / 08 / 2005

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Galip SAİD
(Başkan)




Jüri Üyesi : Doç. Dr. Kubilay ASLANTAŞ



Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Şükrü TALAS



Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 14.09.2005..... Gün ve 2005/12-11... sayılı kararı ile onaylanmıştır.


Prof. Dr. Fatih NURAY
Enstitü Müdürü

TANE BOYUTUNUN HMK KAFESLİ METALLERİN TEMEL MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

ÖZET

Bu çalışmada tane boyutunun temel mekanik özellikler üzerine etkisi HMK kafesli AISI 1030, AISI 8620 ve AISI 1016 çelikleri üzerinde araştırılmıştır. Çelikler için Fe-Fe₃C faz diyagramında östenitleme bölgesi olarak adlandırılan A₃ sıcaklığı üzerinde üç ayrı tam tavlama sıcaklığı seçilmiştir. Seçilen sıcaklıklarda çeliklere tam tavlama işlemi uygulanmıştır.

Tam tavlama sıcaklıkları ve bekletme süreleri arttıkça, deneye tabi tutulan çeliklerin ortalama tane boyutları da artmıştır. Artan tane boyutu ile birlikte çeliklerin mukavemet değerlerinde (akma gerilimi, çekme gerilimi v.s.) azalma gözlemlenmiştir. Tane boyutundaki artış ile birlikte çeliklerin kırılma tokluğu değerleri de artmıştır.

Tam tavlama ısıl işlemlerine tabi tutulmuş çeliklerin daha sonra tek eksenli çekme deneyleri yapılmıştır. Tek eksenli çekme deneyi sonucu elde edilen veriler MATLAB 6.5 programı vasıtası ile işleme tabi tutularak genel sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tane Boyutu, Tam Tavlama, Mekanik Özellikler

THE EFFECT OF GRAIN SIZE ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF BCC METALS

ABSTRACT

In this study, the effect of grain size on the mechanical properties of bcc steels has been investigated using AISI 1030, AISI 8620 and AISI 1016. Three different full annealing temperatures were chosen above A_3 temperature which is also known as austenization region in Fe-Fe₃C phase diagram. Heat treatments were carried out at chosen temperatures.

Increasing full annealing temperature and holding time also leads to the increased grain sizes. With increasing grain size, mechanical properties such as yield strength, tensile strength etc of steels studied were seen to decrease. Fracture toughness values of steels increases with increasing grain sizes.

Full annealing treated steels were followed by single axis tensile tests. Single axis tensile test results were processed using MATLAB 6.5 software to obtain a generalised results.

Keywords: Grain size, Full Annealing, Mechanical Properties

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI	3
3. DEMİR ve ALAŞIMLARI	5
3.1 Demir-Karbon (Fe-C) veya Demir-Sementit (Fe-Fe ₃ C) Faz Diyagramı	5
3.1.1 Fe-Fe ₃ C Faz Diyagramındaki Katı Eriyikler.....	9
3.1.2 Üç Faz Reaksiyonları	9
3.1.3 Mikro Oluşumlar	10
3.2 Çeliklerin Sınıflandırılması.....	10
3.2.1 Karbon ve Alaşım Bileşimlerine Göre Çelikler	11
3.2.1.1 Çeliklerin Karbon Oranına Göre Sınıflandırılması	11
3.2.1.2 Çeliklerin Alaşım Bileşimlerine Göre Sınıflandırılması.....	12
3.3 Alaşım Elementlerinin Çelik Yapısına Etkisi	13
3.4 Malzemelerde Mukavemet Arttırma Yöntemleri.....	19
3.4.1 Tane İnceltme.....	20
3.4.2 Tane Boyutunun Temel Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi	22
3.4.3 Tane Büyümesi	24
3.4.4 Alaşım Elementlerinin Tane Büyümesine Etkileri	25
4. ÇELİKLERE UYGULANAN ISIL İŞLEM ÇEŞİTLERİ	26
4.1 Isıl İşlemlerin Genel Grafiği	28
4.2 Isıl İşlemin Malzeme Özellikleri Üzerine Etkisi.....	30
4.3 Isıl İşlem Çeşitleri	31
4.3.1 Tavlama.....	31
4.3.2 Rekristalizasyon	31
4.3.3 Tam Tavlama	33

4.3.4 Normalleştirme Tavlama (Normalizasyon)	35
4.3.5 İzotermal Tavlama	37
4.4 Yumuşatma Tavlama	38
4.5 Gerilim Giderme Tavlama	39
5. KIRILMA MEKANİĞİ LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	42
5.1 Kırılma Çeşitleri	43
5.1.1 Gevrek Kırılma	46
5.1.2 Sünek Kırılma	47
5.2 Gerilim Konsantrasyonları.....	49
5.3 ASTM E-399 Standardı	53
5.4 Düzlemsel Gerilim ve Düzlemsel Deformasyon Durumları	59
5.5 HMK Kafesli Metallerde Akma Gerilimine Sıcaklığın Etkisi	62
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	63
6.1 Tez Çalışmasında Kullanılan Çelikler	63
6.2. Çeliklere Uygulanan Isıl İşlemler	64
6.3 Çekme Deneyi	66
6.4 Metalografik İncelemeler ve Ortalama Tane Boyutu Hesabı	74
6.4.1 Ortalama Tane Boyutunun Belirlenmesi	75
7. SONUÇLAR ve TARTIŞMA.....	76
7.1 SONUÇLAR.....	76
7.1.1 AISI 1030 Çeliği İçin Deneysel Sonuçlar	76
7.1.2 AISI 8620 Çeliği İçin Deneysel Sonuçlar	87
7.1.3 AISI 1016 Çeliği İçin Deneysel Sonuçlar	98
7.1.4 AISI 1030, AISI 8620 ve AISI 1016 İçin Sonuçların Karşılaştırılması	110
7.2 TARTIŞMA	112
REFERANSLAR.....	113
TEŞEKKÜR	
ÖZGEÇMİŞ	
EKLER	117

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1 a) Fe-C Faz Diyagramı. b) Demirin Polimorf Dönüşümü Grafiği.....	7
Şekil 3.2 Demir-Karbon Diyagramının Metastabil Sistem ve Yapı Bileşimi	8
Şekil 3.3 Karbon Miktarının Haddelenmiş Haldeki Alaşimsız Çeliğin Mekanik Özelliklerine Etkisi.....	14
Şekil 3.4 HMK Kafesli Çelikler İçin Alaşım Elementi Miktarının Akma Dayanımına Etkisi.....	19
Şekil 3.5 Bir Engel (Tane Sınırı, Parçacık vb) Önünde Dislokasyon Yığılması .	20
Şekil 3.6 Dislokasyon' un Bir Tane Sınırı İle Durdurulması.....	21
Şekil 3.7 Dislokasyon ve Tane Sınırı Yoğunluğu.....	22
Şekil 3.8 Gerilim Dağılımı.....	22
Şekil 3.9 Ferrit Tane Boyutunun Tavlanmış Yumuşak Çeliğin Dayanımı Üzerine Etkisi	23
Şekil 4.1 Demir-Karbon Faz Diyagramında Çelik ve Tav Sıcaklıkları Bölgeleri	27
Şekil 4.2 Isıl İşlemlerin Genel Grafiği	28
Şekil 4.3 Östenit'in Soğuma Hızına Bağlı Olarak Yaptığı Dönüşümler	29
Şekil 4.4 Rekristalizasyon İşleminin Şematik Gösterimi.....	32
Şekil 4.5 Bazı Metaller İçin Yeniden Kristalleşme ve Ergime Sıcaklıkları.....	32
Şekil 4.6 % 0,2 C İçeren Çelikte Tam Tavlama Sonucu Oluşan Mikro Yapı Değişiklikleri.....	34
Şekil 4.7 Ötektoid Altı Çelikler (< %C 0,8) İçin Tam Tavlama İşleminin Genel Grafiği	34
Şekil 4.8 Ötektoid Altı Çeliklerde Tam Tavlama İşleminin TTT Diyagramı.....	35
Şekil 4.9 Normalizasyon İşleminin Genel Grafiği.....	36
Şekil 4.10 Normalizasyon Tavlama Sıcaklığı ve Zamana Bağlı Olarak İç Yapının Dönüşmesi	37
Şekil 4.11 Ötektoid Altı Çelikler İçin İzotermik Tavlama İşleminin TTT Diyagramı.....	38
Şekil 4.12 Sade Karbonlu Çeliklerin Özellikleri Üzerine Karbon Miktarı ve Isıl İşlem Çeşitlerinin Etkisi.....	40
Şekil 5.1 Kırılma Faktörleri	44

Şekil 5.2 Sünek Kırılma (a) Dislokasyon Yığılması Sonucu Boşluk Oluşumu, (b) Çekme Etkisinde Büzülme, Çatlak Oluşumu ve Kırılma.....	45
Şekil 5.3 (a) Taneler Üzeri (Transkristalit) Kırılma, (b) Tane Sınırları Arası (İnterkristalit) Kırılma.....	45
Şekil 5.4 Malzemelerin Çeşitli Yükleme Durumları ve Gerilim Konsantrasyonu'nun Sünek-Gevrek Geçiş Sıcaklığına Etkisi (IOFFE Şeması).....	46
Şekil 5.5 (a) Gevrek Kırılma, Hiç veya Çok Az Plastik Deformasyon (b) Sünek Kırılma da, Plastik Deformasyon İçin Enerji Gereksinimi	48
Şekil 5.6 (a) Gevrek Kırılma için Çatlak Ucundaki Plastik Deformasyon Bölgesi (b) Sünek Kırılma için Çatlak Ucundaki Plastik Deformasyon Bölgesi.....	48
Şekil 5.7 Makine Elemanlarında Bulunan Bazı Gerilim Konsantrasyonu Şekilleri.	49
Şekil 5.8 Elips (a) ve Romb (b) Şeklindeki Gerilim Konsantrasyonları.....	50
Şekil 5.9 Eliptik Delikteki (a= 3b) Gerilim Konsantrasyonu Bölgesindeki Gerilimler	51
Şekil 5.10 Dinamometrenin Montaj Metodu ve Klips Ölçüleri.....	54
Şekil 5.11 Üç Tip Kuvvet-Çatlak Açılma (P - V) Grafiği.	55
Şekil 5.12 K_{Ic} 'nin Saptanması İçin Gerekli Eğme Numunesi.....	56
Şekil 5.13 ASTM Standardına Göre I. Tip Numune Şekli.	56
Şekil 5.14 ASTM Standardına Göre II. Tip Numunenin Şematik Gösterimi.	57
Şekil 5.15 ASTM Standardına Göre III. Tip Numune Şeklinin Şematik Gösterimi.	58
Şekil 5.16 ASTM Standardına Göre IV. Tip Numune Şekli	58
Şekil 5.17 Düzlemsel Gerilim ve Düzlemsel Deformasyon Durumları.....	59
Şekil 5.18 Kırılma Tipleri.	60
Şekil 5.19 Kritik Gerilim Şiddet Katsayısının, Numune Kalınlığı İle Değişim Grafiği	61
Şekil 5.20 HMK ve YMK Kafesli Metal ve Alaşımlarında Akma Geriliminin Sıcaklıkla Değişimi.....	62
Şekil 6.1 Silindirik Çekme Deneyi Numunesi.	66
Şekil 6.2 Çekme Deneyinde Elde Edilen Kuvvet-Deformasyon (P-Δl) Grafiği..	67

Şekil 6.3 Pekleşme Katsayısının Belirlenmesi İçin Çizilen $\ln\sigma_i - \ln\epsilon_i$ Logaritmik Değişimi Grafiği.....	68
Şekil 6.4 Akma Geriliminin β_y İle İlişkisi.....	69
Şekil 6.5 Akma Geriliminin Atermik (σ_0) Kısmını Değerlendirme Üzerine Bir Şema.....	70
Şekil 6.6 Yumuşak Çelikler İçin Sünek-Gevrek Geçiş Sıcaklığı T_* ve Tane Boyutu “d” Arasındaki İlişki [Petch].....	72
Şekil 6.7 Sünek-Gevrek Geçiş Sıcaklık Sınırı “ T_* ” ve Tane Boyutu “d” Arasındaki İlişki.....	73
Şekil 6.8 Çeliklerin ortalama tane boyutunu tayin etmek için kullanılan yöntemin şematik görünüşü.	75
Şekil 7.1 AISI 1030 Çeliğinin Satıldığı Durumdaki Mikroyapı Fotoğrafı (100X).....	78
Şekil 7.2 AISI 1030 Çeliğinin 900 °C’ de 1 Saat Tam Tavlanmış Mikroyapı Fotoğrafı (100X).	78
Şekil 7.3 AISI 1030 Çeliğinin 1100 °C’ de 1,5 Saat Tam Tavlanmış Mikroyapı Fotoğrafı (100X).	79
Şekil 7.4 AISI 1030 Çeliğinin 1300 °C’ de 2,5 Saat Tam Tavlanmış Mikroyapı Fotoğrafı (100X).	79
Şekil 7.5 AISI 1030 Çeliği İçin Akma Gerilimi ve Tane Boyutu İlişkisi.....	81
Şekil 7.6 AISI 1030 Çeliği İçin T_* ve $\ln d^{-1/2}$ Grafiği.	82
Şekil 7.7 AISI 1030 Çeliği İçin Çeşitli Tane Boyutları ile Akma Gerilimi Arasındaki İlişkiyi Gösteren Grafik.....	83
Şekil 7.8 AISI 1030 Çeliği İçin Akma Gerilimi, Kırılma Tokluğu ve Tane Boyutu İlişkisi.....	86
Şekil 7.9 AISI 1030 için A, σ_0 , K_{1c} , α ve tane boyutu “d” arasındaki ilişki grafiği.....	87
Şekil 7.10 AISI 8620 Satıldığı Durumdaki Mikro Yapı Fotoğrafı (100X).....	89
Şekil 7.11 AISI 8620 Çeliğinin 950 °C’ de 1 Saat Tam Tavlanmış Mikroyapı Fotoğrafı (100X).	89
Şekil 7.12 AISI 8620 Çeliğinin 1150 °C’ de 1,5 Saat Tam Tavlanmış Mikroyapı Fotoğrafı (100X).	90

Şekil 7.13 AISI 8620 Çeliğinin 1300 °C' de 2,5 Saat Tam Tavlanmış Mikroyapı Fotoğrafi (100X).	90
Şekil 7.14 AISI 8620 Çeliği için Akma Gerilimi ve Tane boyutu arasındaki ilişki	92
Şekil 7.15 AISI 8620 Çeliği İçin T^* ve $\ln d^{-1/2}$ Grafiği.....	93
Şekil 7.16 AISI 8620 İçin Çeşitli Tane Boyutları İçin Akma Geriliminin Değişimi	94
Şekil 7.17 AISI 8620 Çeliği için Akma Gerilimi, Kırılma Tokluğu ve Tane Boyutu İlişkisi.	97
Şekil 7.18 AISI 8620 için A , σ , K_{1c} , α ve Tane Boyutu “d” Arasındaki İlişki Grafiği	98
Şekil 7.19 AISI 1016 Satıldığı Durumdaki Mikro Yapı Fotoğrafi (100X).....	100
Şekil 7.20 AISI 1016 Çeliğinin 950 °C' de 1 Saat Tam Tavlanmış Mikroyapı Fotoğrafi (100X)	100
Şekil 7.21 AISI 1016 Çeliğinin 1150 °C' de 1,5 Saat Tam Tavlanmış Mikroyapı Fotoğrafi (100X).	101
Şekil 7.22 AISI 1016 Çeliğinin 1300 °C' de 2,5 Saat Tam Tavlanmış Mikroyapı Fotoğrafi (100X).	101
Şekil 7.23 AISI 1016 Çeliği için Akma Gerilimi ve Tane Boyutu İlişkisi.	103
Şekil 7.24 AISI 1016 Çeliği İçin T^* ve $\ln d^{-1/2}$ Grafiği.	104
Şekil 7.25 AISI 1016 için Çeşitli Tane Boyutları ile Akma Gerilimi Arasındaki İlişki	105
Şekil 7.26 AISI 1016 Çeliği için Akma Gerilimi, Kırılma Tokluğu ve Tane Boyutu İlişkisi.	108
Şekil 7.27 AISI 1016 İçin A , σ , K_{1c} , α ve Tane Boyutu “d” Arasındaki İlişki Grafiği	109
Şekil 7.28 AISI 1030, AISI 8620 ve AISI 1016 Çelikleri İçin Tam Tavlama Sıcaklıklarına Bağlı Olarak Tane Boyutundaki Değişim Grafiği	110

ÇİZELGELER DİZİNİ

Tablo 6.1 AISI 1030 Çeliğinin Spektro Analiz Sonuçları	63
Tablo 6.2 AISI 8620 Çeliğinin Spektro Analiz Sonuçları	63
Tablo 6.3 AISI 1016 Çeliğinin Spektro Analiz Sonuçları	64
Tablo 6.4 AISI 1030 Çeliği İçin Isıl İşlem Rejimleri.....	64
Tablo 6.5 AISI 8620 Çeliği İçin Isıl İşlem Rejimleri.....	65
Tablo 6.6 AISI 1016 Çeliği İçin Isıl İşlem Rejimleri.....	65
Tablo 7.1 AISI 1030 Çeliği Çekme Deneyi Numunelerinin Ölçüleri ve Deney Sonuç Verileri	77
Tablo 7.2 AISI 1030 Çeliği İçin Isıl İşlem Çeşidi, Akma Gerilimi ve Tane Boyutu Değerleri.....	80
Tablo 7.3 AISI 1030 Çeliği için Uygulanan Sıcaklık Rejimleri, Tane Boyutu ve Akma Gerilimi Değerleri	81
Tablo 7.4 AISI 1030 Çeliği İçin T_* ve Tane Boyutu ($\ln d^{-1/2}$) Değerleri	82
Tablo 7.5 AISI 1030 Çeliği için Formül (6.18) ve (6.20)' ye Göre Çeşitli Tane Boyutları (d) İçin Elde Edilmiş Olan σ_y Değerleri Tablosu.....	83
Tablo 7.6 AISI 1030 Çeliğinin Satıldığı Durum İçin MATLAB Hesaplamaları İçin Programa Girilen Malzeme Özellikleri.....	84
Tablo 7.7 AISI 1030 Çeliği İçin MATLAB Programı İle Elde Edilen Sonuçlar..	85
Tablo 7.8 AISI 1030 Çeliği İçin Akma Gerilimi, Tane Boyutu Ve MATLAB Hesaplamaları Sonucu Elde Edilen Kırılma Tokluğu Değerleri.....	86
Tablo 7.9 AISI 1030 Çeliği İçin MATLAB Hesaplamaları Sonucu Elde Edilen A , σ_0 , K_{1c} , α ve Tane Boyutu “d” Değerleri	87
Tablo 7.10 AISI 8620 Çeliği Denen Numunelerinin Ölçüleri ve Deney Sonuçları	88
Tablo 7.11 AISI 8620 Çeliği İçin Isıl İşlem Çeşidi, Akma Gerilimi ve Tane Boyutu Değerleri.....	91
Tablo 7.12 AISI 8620 Çeliği İçin Uygulanan Sıcaklık Rejimleri, Tane Boyutu ve Akma Gerilimi Değerleri	92
Tablo 7.13 AISI 8620 Çeliği İçin T_* ve Tane Boyutu ($\ln d^{-1/2}$) Değerleri	93

Tablo 7.14 AISI 8620 Çeliği için Formül (6.18) ve (6.20)' e Göre Çeşitli Tane Boyutları (d) İçin Elde Edilmiş Olan σ_y Değerleri Tablosu.....	94
Tablo 7.15 AISI 8620 Çeliği İçin MATLAB Programı İle Elde Edilen Sonuçlar	96
Tablo 7.16 AISI 8620 Çeliği İçin Akma Gerilimi, Tane Boyutu ve MATLAB Hesaplamaları Sonucu Elde Edilen Kırılma Tokluğu Değerleri.....	97
Tablo 7.17 AISI 8620 Çeliği için MATLAB hesaplamaları sonucu elde edilen A , σ_o , K_{1c} , α ve tane boyutu “d” değerleri	98
Tablo 7.18 AISI 1016 Çeliği Deney Numunelerinin Ölçüleri ve Deney Sonuçları	99
Tablo 7.19 AISI 1016 Çeliği İçin Isıl İşlem Çeşidi, Akma Gerilimi ve Tane Boyutu Değerleri.....	102
Tablo 7.20 AISI 1016 Çeliği için Uygulanan Sıcaklık Rejimleri, Tane Boyutu ve Akma Gerilimi Değerleri	103
Tablo 7.21 AISI 1016 Çeliği İçin T_* ve Tane Boyutu ($\ln d^{-1/2}$) Değerleri	104
Tablo 7.22 AISI 1016 için Formül (6.18) ve (6.20)' e Göre Çeşitli Tane Boyutları (d) İçin Elde Edilmiş Olan σ_y Değerleri Tablosu.....	105
Tablo 7.23 AISI 1016 Çeliği İçin MATLAB Programı İle Elde Edilen Sonuçlar	107
Tablo 7.24 AISI 1016 Çeliği İçin Akma Gerilimi, Tane Boyutu ve MATLAB Hesaplamaları Sonucu Elde Edilen Kırılma Tokluğu Değerleri.....	108
Tablo 7.25 AISI 1016 Çeliği İçin MATLAB Hesaplamaları Sonucu Elde Edilen A , σ_o , K_{1c} , α ve Tane Boyutu “d” değerleri	109
Tablo 7.26 AISI 1030, AISI 8620 ve AISI 1016 Çelikleri İçin Tam Tavlama Sıcaklıkları ve Ortalama Tane Boyutu Değerleri.....	110
Tablo 7.27 AISI 1030, AISI 8620 ve AISI 1016 Çelikleri İçin Çeşitli Değerlerin Karşılaştırılması	111

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

HMK	Hacim Merkezli Küp Kafes
YMK	Yüzey Merkezli Küp Kafes
ASTM	Amerikan Standartları
σ_y	Akma Gerilimi
S_{kop}	Kopma Gerilimi
δ	Uzama Oranı
ψ	Daralma Oranı
n	Pekleşme Katsayısı
A_0	Tek eksenli Çekme Deneyi Numunesinin Deney Öncesi İlk Kesit Yüzeyi
A_k	Tek Eksenli Çekme Deneyi Numunesinin Deney Sonrası Kesit Yüzeyi
l_0	Tek Eksenli Çekme Deneyi Numunesinin Deney Öncesi İlk Çalışma Boyu
l_k	Tek Eksenli Çekme Deneyi Numunesinin Deney Sonrası Çalışma Boyu
d_0	Tek Eksenli Çekme Deneyi Numunesinin Deney Öncesi İlk Çapı
d_k	Tek Eksenli Çekme Deneyi Numunesinin Deney Sonrası Çapı
d	Ortalama Tane Boyutu
T^*	Sünek-Gevrek Geçiş Sıcaklık Sınırı
K_{Ic}	Kırılma Tokluğu
A	Akma Geriliminin $T = 0$ K Sıcaklığındaki Değeri
α	Akma Geriliminin Belirli Bir Deformasyon Hızında Sıcaklığa Hassasiyetini Gösteren Parametre
Δ	P- Δ L Grafiğinde Bölümlenmiş Kesitler Arasındaki Mesafe
σ_0	Akma Geriliminin Sıcaklıktan Bağımsız Değeri
d_{ort}	Çelikler İçin Ortalama Tane Boyutu
m	Kırılma Tokluğunun Sıcaklığa Hassasiyetini İfade Eden Parametre

1. GİRİŞ

Günümüzde kullanılmakta olan yapısal çeliklerden veya özel çeliklerden kullanım yerleri ve kullanım amaçlarına göre daha iyi mekanik özellikler göstermesi istenilmektedir. Malzeme üretimi için kullanılan çevre şartları, dayanım ve ağırlık oranları istenilen mekanik özelliklere etki etmektedir. Bu amaç doğrultusunda metalurji mühendisleri, sanayinin ve kullanım yerlerinin temel ihtiyaçları doğrultusunda daha ekonomik yeni malzemeler üretmeye çalışmakta ya da üretilmiş ve pratikte kullanılmakta olan malzemelere bazı ek işlemler uygulayarak daha iyi mekanik özellikler kazandırmaya çalışmaktadırlar. Bu çalışmaların temelini makine parçası ve konstrüksiyon malzemelerinde meydana gelen hasarlar oluşturmaktadır. Hasarlardan en tehlikelisi, malzeme içerisinde bir çatlakın meydana gelmesi, meydana gelen çatlakın dış kuvvet etkisi ile ilerleyerek çoğu kez mal ve can kaybı ile sonuçlanan kırılma veya kopma hasarlarıdır.

Uygulanan işlem şartlarına göre malzeme mikroyapısı değişikliğe uğramaktadır. Mikroyapıdaki meydana gelen bu değişiklikler malzemenin mekanik özelliklerini etkilemektedir. Bu işlemlere alaşımlama, soğuk şekillendirme, tane inceltme, ayrışım sertleştirilmesi (yaşlanma, dispersiyon sertleştirilmesi), dönüşüm sertleştirilmesi, yüzey sertleştirilmesi örnek olarak gösterilebilir. Tane boyutu inceltme metallerde mukavemet artırma yöntemlerinden sadece bir tanesidir.

Ferrit tane boyutu, düşük karbonlu çeliklerin akma dayanımı üzerine büyük bir etkiye sahiptir. Aynı karbon içerikleri ve ısıl işlem için ince taneli düşük karbonlu çelikler kaba taneli çeliklerden daha yüksek dayanıma sahiptirler.

Bu çalışmada AISI 1030, AISI 8620 ve AISI 1016 çeliklerini değişik sıcaklıklarda tam tavlama işlemine tabi tutarak ortalama tane boyutlarının artması sağlanmıştır. Bu çeliklerden standartlara uygun olarak tek eksenli çekme deneyi numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin boyut ölçüleri ve çekme deneyi sonucunda elde edilen değerler vasıtası ile MATLAB matematiksel hesaplama programında mekanik özellik değerleri elde edilmiştir.

Çalışmada, HMK kafes yapısına sahip olan AISI 1030, AISI 8620 ve AISI 1016 eliklerin temel mekanik zellikleri (Akma gerilimi, çekme gerilimi, kopma gerilimi, kırılma tokluğu v.s.) zerine değişik ortalama tane boyutunun etkisi araştırılmıştır. Bu doğrultuda malzemelerin tane boyutu ayarlaması ile istenilen mekanik özelliklere yakın özellikler kazandırmanın mümkün olup olmadığı tespit edilmiştir.



2. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Günümüzde makine parçaları ve konstrüksiyon malzemelerinde meydana gelen hasarlar önemle dikkat edilmesi gereken noktalardandır. Yapısal uygulamalardaki hasarlardan en tehlikelisi ise çoğu zaman mal ve can kaybına neden olan kırılma veya kopma ile hasardır. Kırılma türlerinden en tehlikelisi, az veya hiç plastik deformasyon göstermeyen gevrek kırılmalardır. Malzeme bilimciler için kalite kontrol niteliği taşıyan kırılma türleri ve kırılma tokluğu, en önemli çalışma konusudur.

Kırılma tokluğunun belirlenmesinde özellikle ASTM standartlarında belirtilen deney numunelerinin hazırlanması zahmetli ve yüksek maliyet gerektiren bir yöntemdir. ASTM E399' da tanımlanan teknik oldukça karmaşık ve aynı davranışı gösteren bir çok çeliklerin kırılma tokluğunun değerlendirilmesini önlemektedir. Çünkü; standart düzlemsel gerilim-gerinim şartlarını sağlamak için büyük boyutlu numuneler gerektirmektedir. Bu zahmetli ve ekonomik sayılmayan ASTM standartlarına alternatif olarak Said ve Taşgetiren (2003), yapmış oldukları çalışmada kırılma mekaniği üzerine gerçekleştirilen bir çok araştırmaya rağmen güvenilir, ekonomik ve kolay bir teknik henüz düşük ve orta dayanımlı çelikler için geliştirilmediğini belirtmişlerdir. Said ve Taşgetiren (2003) önerdikleri tekniğe göre kırılma tokluğu iki deneyle yapılabilir. Birincisi oda sıcaklığında silindirik çekme numunesi ile yapılan tek eksenli çekme deneyidir. Diğeri ise; ASTM E399' a göre düşük sıcaklıklarda (örneğin 77 K) kırılma tokluğu testi deneyidir. Bu sıcaklıklarda küçük numune vasıtasıyla teorik temeller üzerinde kurulan matematiksel işlemler oldukça yüksek hassasiyetli deneylerle uyumlu sonuçlar vermiştir. Teorik kısımdaki temel kavram iki gözleme dayanır. Birincisi; çatlak ucundaki plastik deformasyon ,termoaktivasyon enerjisinin artan değerine bağlı kırılma tokluğu, ikincisi; çatlak ucunun hemen ilerisindeki kritik gerilime maruz kalmış bir bölgede ortaya çıkan mikro çatlak ve bunun ana çatlağa bağlanmasıdır.

Akma gerilimi, sıcaklık ve deformasyon hızının çok hassas olduğu HMK kafesli metal ve alaşımlar da kırılma tokluğunun saptanması için yeni bir metot

önerilmiştir. Bu malzemelerin sıcaklığa bağlı olarak deformasyon karakteristikleri ve enerjileri değişir. Hipotezde ileri sürülen HMK kafesli metal ve alaşımların kırılma tokluğu çatlak ucundaki plastik deformasyonun termoaktivasyon enerjisine exponansiyal olarak bağlanmıştır. Çalışmanın teorik temeli iki açıdan ele alınır: (1) Söz konusu alaşımların akma gerilimi ile sıcaklık grafiğindeki atermik ve termoaktivasyon bölgelerinin farkı. (2) Kritik gerilim altında çatlak ucunda mikro çatlakların gelişmesi ve sonra çoğalarak ana çatlağın büyümesi ile çatlak çoğalma mekanizması. Kırılma tokluğu, temel mekanik özellikler ve çeliklerin mikro yapısı arasında elde edilen ilişkiler, ASTM standardına göre deneylerin sonuçları ve mevcut çalışmanın sonucu arasında uyuşma vermektedir (Said ve Taşgetiren 2000).

Wallin (2004) çalışmasında, ASTM kırılma tokluğunun belirlenmesinde kullanılan standardı geliştirilmesi kırılma mikro mekanizması dikkate alınarak yapılmıştır. Orijinal olarak standart sürekli mekanik varsayımlar üzerine kurulmuştur. Ancak bu sürekli mekanik varsayımların gerçek fiziksel kırılma işlemini tam tarif etmediği bulunmuştur. ASTM E399' un geliştirilmesinde kullanılan malzemeler genellikle Al, Ti ve yüksek alaşımlı çeliklerdir. Kırılma mikro mekanizmalarında Al, Ti ve yüksek alaşımlı çelikler için ortak olan sünek kırılmadır. Yani malzemeler artan bir kopma direnci gösterir. Dolayısı ile kırılma tokluğu artan numune boyutu ile tahmin edilen bir azalma göstermemekte, aksine artan bir eğilim göstermektedir (isis.hut.fi 2005).

Kırılma mekaniği, makine elemanının kusursuz olmadığını, kusur kavramını ise, ilgili konstrüksiyona uygulanabilecek herhangi bir tahribatsız malzeme muayenesi yönteminin duyarlılık sınırları içerisinde bulunabilecek en küçük kusuru konstrüksiyonun dayanım yönünden en kritik yerinde mevcut olduğu varsayımını almıştır. Kırılma mekaniği, makine elemanı ömrünün hesaplanmasını ya da mevcut olan bir hatanın hasar oluşturacak bir boyuta gelebilmesi için gerekli ömür hesaplarının yapılmasını konu alan bir bilim dalıdır.

3. DEMİR ve ALAŞIMLARI

Demir genellikle tabiatta bileşikler halinde bulunan bir metaldir. Demir cevherleri, diğer cevherlerde olduğu tarzda, iki esas kısımdan oluşur: Mineral ve gang kısmı (gencbilim.com 2004).

Demir - çelik üretiminde en çok kullanılan mineraller şunlardır:

Magnetit (Fe_3O_4), Hematit (Fe_2O_3), ayrıca Limonit ve Siderit bulunmakla beraber bunların Fe yüzdesi düşük olduğundan kullanımları çok fazla ekonomik değildir.

Demir alaşımları, öncelikle demir-karbon esaslı olan sade karbonlu çelik alaşımlarını, takım çeliklerini, paslanmaz çelikleri ve dökme demirleri içermektedir.

Demir genellikle entegre demir çelik fabrikalarında demir cevherlerinden elde edilir. Yüksek fırında, kokun (karbon) demir oksidi (genellikle Fe_2O_3) aşağıda verilen tepkime ile indirilmesi sonucu, %4 karbon içeren ham pik demir elde edilir. Bundan sonra yüksek fırında elde edilmiş olan pik demiri genellikle sıvı halde iken çelik yapma fırınına taşınarak burada istenen özelliklere göre dekarburizasyon, deoksidasyon ve gerekli alaşımlama işlemleri yapılır (Smith 2001).



3.1 Demir-Karbon (Fe-C) veya Demir-Sementit (Fe-Fe₃C) Faz Diyagramı

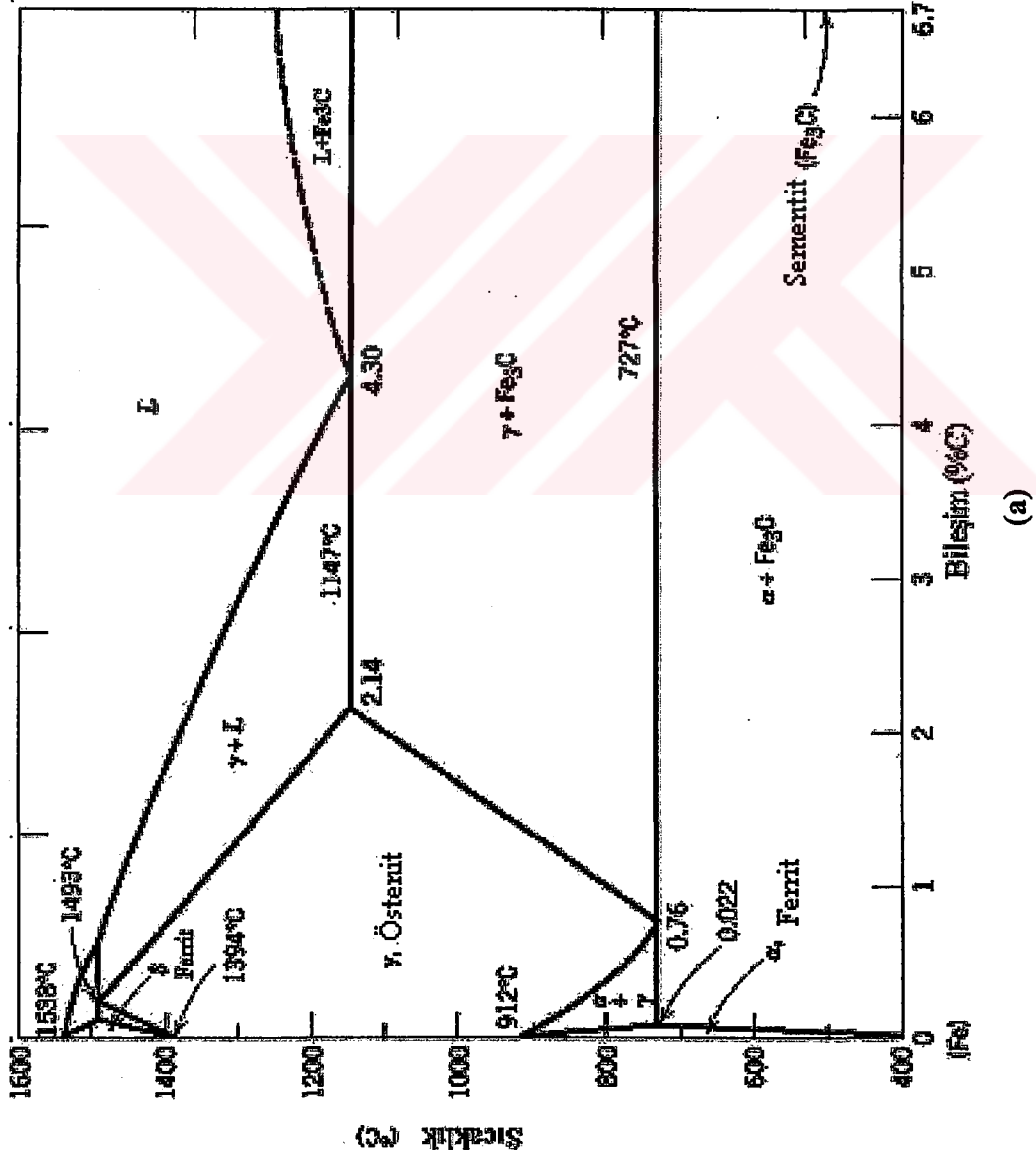
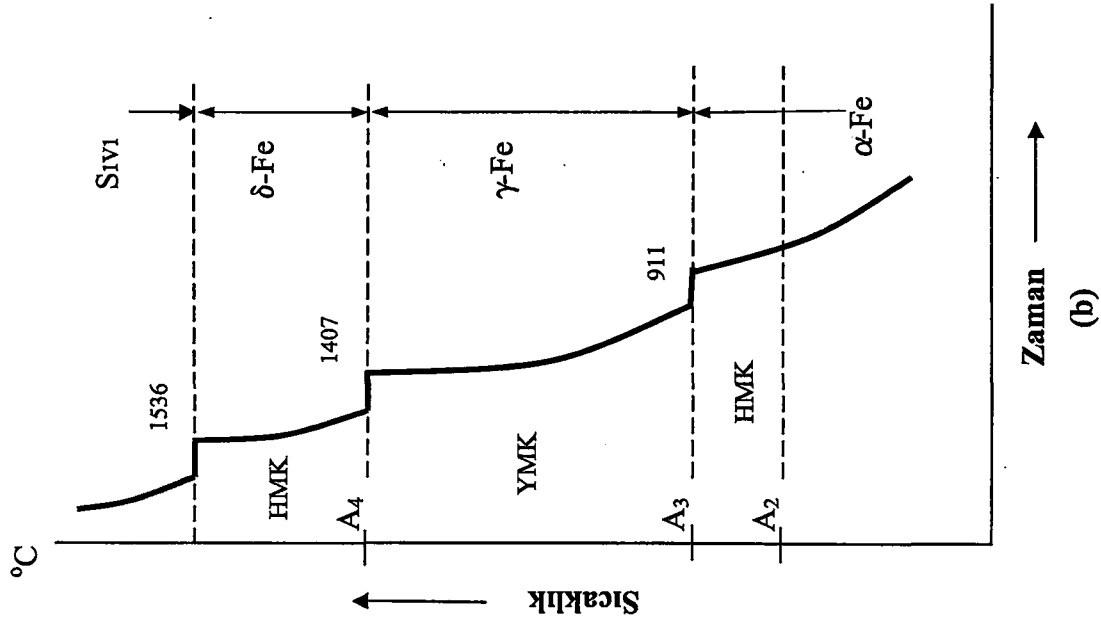
Çok yavaş soğutulmuş demir-karbon alaşımlarında çeşitli bileşim ve sıcaklıklarda %6,67 karbona kadar meydana gelen fazlar Şekil 3.1'deki Fe-Fe₃C faz diyagramında gösterilmiştir. Bazı koşullarda, sementit olarak adlandırılan Fe₃C parçalanarak daha kararlı demir ve karbon (grafit) fazlarına dönüşür.

Fe-Fe₃C faz diyagramında katı eriyikler, üç faz reaksiyonları ve mikro oluşumlar göze çarpmaktadır (Akseland 1998).

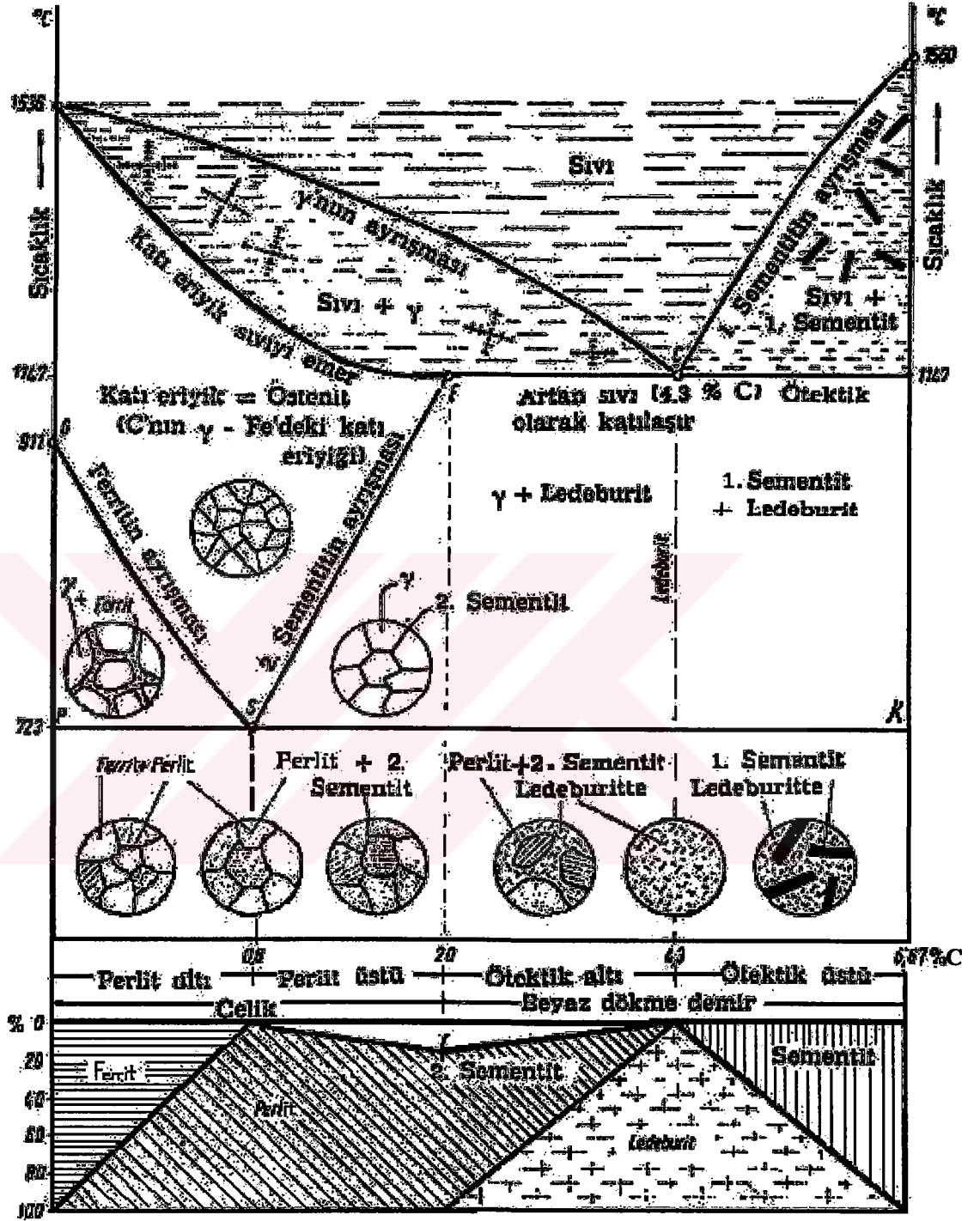
Saf demirde üç katı faz vardır. 1394 °C' den 1538 °C' ye kadar olan sıcaklık aralığında HMK kafes olarak adlandırılan delta demir yapı, 912 °C' den 1394 °C' ye kadar γ -Fe veya östenit olarak adlandırılan YMK kafesli yapı bulunuyor. -273 °C' den 912 °C aralığında α -Fe veya ferrit olarak adlandırılan HMK yapı bulunmaktadır (egr.uh.edu 2004).

Şekil 3.2' de Fe-Fe₃C faz diyagramında pretektik, ötektik ve ötektoit reaksiyonları sonucu meydana gelen içyapı şekilleri gösterilmiştir.





Şekil 3.1 a) Fe-C Faz Diyagramı. b) Demirin Polimorf Dönüşümü Grafiği (web.uik.edu 2004).



Şekil 3.2 Demir-Karbon Diyagramının Metastabil Sistem ve Yapı Bileşimi (Weissbach 1998).

3.1.1 Fe-Fe₃C Faz Diyagramındaki Katı Eriyikler

Fe-Fe₃C faz diyagramında üç katı eriyik çok önemlidir. Bunlar ferrit (α), östenit (γ), δ -demir ve bir intermetalik bileşik olan sementit' dir. Bunlarla beraber dengersiz bir faz olan martenzit hızlı soğutma ile oluşturulabilir (Akseland 1998).

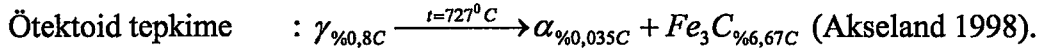
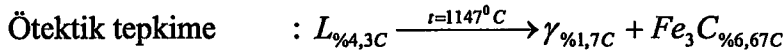
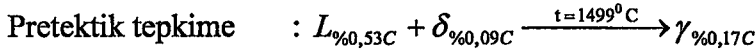
α ferrit: Bu faz HMK demir kristali kafesinde karbonun ara yer katı eriyiğidir. Fe-Fe₃C faz diyagramında da görüldüğü gibi, karbon α ferritte çok az çözünmekte ve en yüksek çözünlük olan %0,02 değerine ise 723 °C sıcaklıkta ulaşmaktadır.

γ östenit: Karbonun γ demirdeki ara yer katı çözeltilisine östenit adı verilmektedir. YMK kafes yapısına sahip olan östenitte karbonun çözünlüğü çok daha fazladır. Östenitteki karbonun katı çözünlüğü 1148 °C sıcaklıkta en yüksek değeri olan % 2,14 de ulaşmakta bununla beraber 723 °C de bu çözünlük ~ % 0,8' e düşmektedir.

δ ferrit: Karbonun δ demirdeki katı çözeltilisidir. α ferrit gibi bu katı eriyikte HMK kafes yapısına ve daha büyük kafes parametrelerine sahiptir. Karbonun δ ferritteki en yüksek katı çözünlüğü 1495 °C' de % 0,09' dur.

Sementit (Fe₃C): Sementit bir metaller arası bileşiktir. Önemsiz derecede çözünlük sınırına sahip olan sementit'in bileşimi % 6,67 karbon ve % 93,3 demir' dir. Sementit sert ve gevrek bileşiktir (Smith 2000).

3.1.2 Üç Faz Reaksiyonları



3.1.3 Mikro Oluşumlar

Meydana gelebilecek bir çok mikro oluşum, ötektoid reaksiyonun nasıl kontrol edildiğine bağlıdır. Bu durum ötektoid reaksiyonun demir ve alaşımlarında oluşacak iç yapı özellikleri için ne derece önemli olduğunu göstermektedir.

Perlit, ferrit ve sementitin lamelli bir karışımıdır. Beynit ise daha geniş bir alt soğutmada, östenit'in dönüşümü ile elde edilen ferrit ve sementitin lamelli olmayan karışımıdır. İlk ferrit veya ilk sementitin her birinin oluşabilmesi orijinal alaşımın kompozisyonuna bağlıdır. Martenzit, oluşumunun ardından temperleme için tekrar ısıtıldığında, temperlenen martenzit, ferrit ve sementit karışımı oluşturmaya yöneltilmiştir (Akseland 1998).

3.2 Çeliklerin Sınıflandırılması

Çelik, demir (Fe) ve karbon (C) alaşımıdır. Karbon dışında, çelik içerisinde farklı oranlarda alaşım elementleri de bulunur. Çeliğe farklı mekanik özellikler kazandıran, içerdiği elementlerin kimyasal bileşimi ve çeliğin içyapısıdır. Çeliğe değişik oranlarda alaşım elementleri katılabileceği gibi, çeşitli işlemler (ıslah etme, temperleme, normalizasyon vs.) ile içyapı da kontrol edilerek kullanım amaçlarına göre değişik özelliklerde çelik elde edilir.

Çelikler genel olarak aşağıdaki şekilde sınıflandırılmaktadır;

- Karbon ve alaşımlı çelik olarak bileşimlerine göre,
- Üretim yöntemlerine göre,
- Son üretim yöntemine göre,
- Ürün şekline göre,
- Kullanım yerleri, üretim programları ve deoksidasyon durumlarına göre (cemtas.com.tr 2004).

3.2.1 Karbon ve Alaşım Bileşimlerine Göre Çelikler

3.2.1.1 Çeliklerin Karbon Oranına Göre Sınıflandırılması

Saf demir, yumuşak bir metaldir. %0.2 gibi az miktarda karbon saf demire eklenecek olursa, karbonlu çelik elde edilir. Karbonlu çelikler, karbon oranına göre sınıflandırılır. Her ne kadar kesin sınırlar yoksa da yaklaşık olarak karbonlu çelikler aşağıda belirtildiği gibi sınıflandırılabilir (yildirimdemicelik.com 2004).

I. Düşük Karbonlu Çelikler

Bu tür çelikler, % 0,25 oranına kadar karbon içerirler. Çok yumuşak ve yumuşak çelikler olmak üzere iki gruba ayrılırlar (odevsitesi.com 2004).

a. Çok Yumuşak Çelikler: % 0,07 ile % 0,15 arasında karbon içerirler ve soğuk şekillendirmeye elverişlidirler.

b. Yumuşak Çelikler: % 0,15 ile % 0,25 oranında karbon içerirler. Çok yaygın olarak kullanılan alaşımsız çeliklerdir. Çok iyi kaynak edilebilirler ve su verme yöntemiyle iyi sertleştirilemezler.

II. Orta Karbonlu Çelikler

Bu çelikler, % 0,25 ile % 0,55 oranları arasında karbon içerirler. Isıl işlem için çok uygun çeliklerdir. Yani, bu çeliklerin yapı ve özellikleri ısıl işlemle büyük ölçüde değiştirilebilir. Bu çelikler, karbon oranlarına göre genel dövme çelikleri, mil çelikleri ve aşınmaya dayanıklı çelikler olmak üzere üç gruba ayrılır.

a. Genel Dövme Çelikleri: % 0,25 ile % 0,35 arasında karbon içerirler.

b. Mil Çelikleri: % 0,35 ile % 0,45 oranları arasında karbon içerirler. Mil, tel ve dingil yapımında kullanılırlar.

c. Aşınmaya Dayanıklı Çelikler: % 0,45 ile % 0,55 arasında karbon içerirler. Ray, ray tekerleği, silindir ve pres kalıplarının yapımında kullanılırlar.

III. Yüksek Karbonlu Çelikler

% 0,55 ile % 0,9 arasında karbon içerirler. Yüksek mukavemet ve aşınma direnci gerektiren yerlerde kullanılırlar. Kullanım alanına örnek olarak, pres kalıp blokları gösterilebilir.

IV. Yüksek Karbonlu Takım Çelikleri

Bu çelikler % 0,9 ile % 1,6 oranları arasında karbon içerirler. Yüksek aşınma direnci ve yüksek mukavemet gerektiren yerlerde kullanılırlar. Kullanım yerlerine örnek olarak torna kalemi ve matkap uçları verilebilir.

3.2.1.2 Çeliklerin Alaşım Bileşimlerine Göre Sınıflandırılması

Alaşım elementleri ferritin katı eriyik mukavemetlenmesini sağlamak, Fe_3C ' den daha fazla alaşım karbür çökmesi sağlamak, çeliğin korozyon direncini sağlamak ve çeliklerin sertleşebilirliğini arttırmak amacıyla istenilen özellikler göz önünde bulundurularak gerekli oranlarda çelik içerisine ilave edilir.

Alaşım miktarlarına göre çelikleri sınıflandıracak olursak;

I. Alaşimsız çelikler

İçerisinde üretim işlemleri sonrası karbon ve cevherden gelen elementler dışında başka element içermeyen çeliklerdir.

II. Düşük Alaşımli Çelikler

Düşük alaşımli çelikler de alaşım elementi miktarı %5'ten azdır. Bu çelikler yüksek mukavemetli yapı çeliği ve makine parçaları üretiminde elverişlidir. Şekil verildikten sonra su verme ile sertlikleri arttırılabilir (Onaran 1993).

Düşük alaşımli çeliklerin özellikleri;

- Isıl işlem uygulandıktan sonra kullanılırlar.
- Isıl işlem uygulandıktan sonra dayanımları 35 kg/mm^2 ' ye yükselir.
- Daha derin sertleşirler.
- Bu çeliklerin dayanımı 140 N ' dan yüksek olamaz (Serfiçeli 2000).

III. Yüksek Alaşımli Çelikler

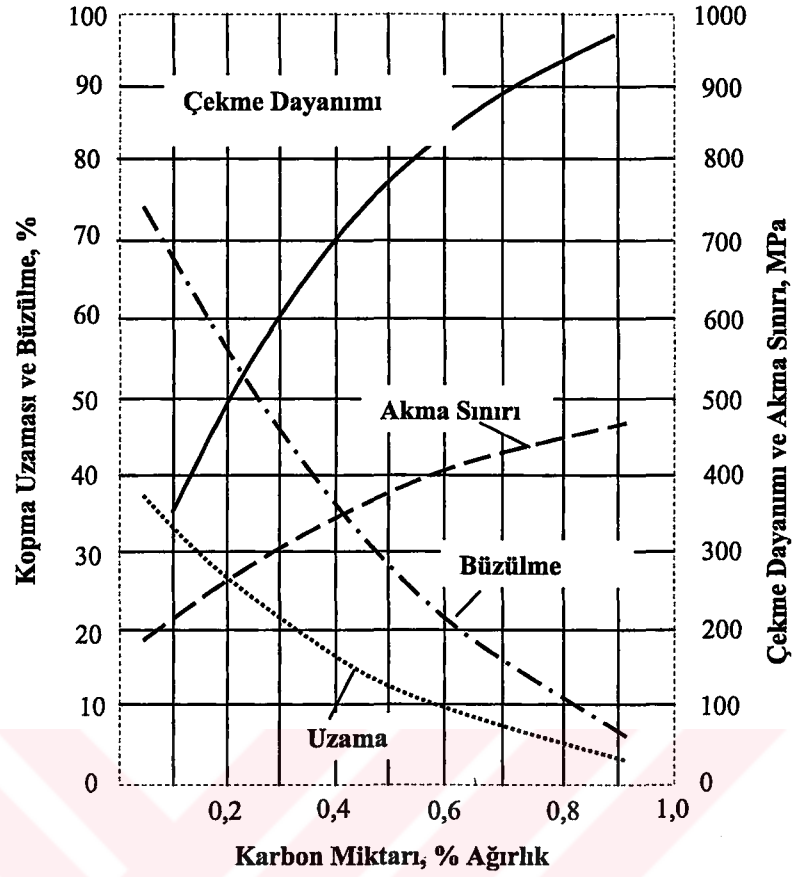
Yüksek alaşımli çelikler, %5'in üzerinde alaşım elementi içermektedirler. Bu çelikler kendi arasında takım ve kalıp çelikleri, aside dayanıklı çelikler, yüksek sıcaklığa dayanıklı çelikler ve hız çelikleri olmak üzere dört gruba ayrılırlar.

3.3 Alaşım Elementlerinin Çelik Yapısına Etkisi

Karbon (C)

Karbon, çelikte en başta sertleştirici etkisi olan elementtir. Karbon miktarındaki artışla birlikte, çeliğin sıcak haddeme veya normalize edilmiş halindeki sertlik ve çekme dayanımı da artar. Buna karşın karbon esnekliği, dövülme kabiliyetini, kaynak edilme ve kesilme özelliklerini zayıflatır.

Karbon miktarı arttıkça çeliğin sünekliği, derin çekilebilirliği ve kaynak edilebilirliği azalır. Isıl işlemde çatlama ve deformasyon eğilimi artar. Karbon miktarının artması ile alaşımli çelikte dayanım ve sertliğin önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Şekil 3.3' de haddelenmiş haldeki alaşımli çeliğin mekanik özellikleri üzerine karbon miktarının etkisi gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Karbon Miktarının Haddelenmiş Haldeki Alaşimsız Çeliğin Mekanik Özelliklerine Etkisi (Topbaş 1998).

Mangan (Mn)

Mangan çeliğin dayanımını geliştirir. Sünekliğini ise bir miktar azaltır. Dövme ve kaynak edilme özelliğine olumlu etkide bulunur. Manganın, sertlik ve dayanımı arttıran özelliği, karbon miktarına bağlıdır. Manganın yüksek karbonlu çeliklerdeki etkisi, düşük karbonlu çeliklere oranla daha fazladır. Mangan su verme derinliğini artırır. Ayrıca mangan paslanmaya ve korozyona karşı direnci de artırır (MKE, 1978).

Silisyum (Si)

Silisyum; çelik dökümlerde fiziksel dayanımı ve özgül ağırlığı artırır. Silisyum, mangan gibi bütün çeliklerde bulunan bir elementtir. Çelik yapımında demir cevherinden veya ocak astarı olan tuğlalardan da bir miktar silis, çeliğin bünyesine kendiliğinden girer. Silisyumlu çelikler deyimli; bileşiminde %0,40 dan

fazla silisyum olan çelikler için kullanılır. %14 arasında silisyum bulunan çelikler, kimyasal tepkilere karşı dayanımlı olduklarından, bu durumdaki çelikler dvlemezler (celicticaret.com 2004).

Fosfor (P)

Fosfor, eliğın akma ve çekme dayanımını artırır. Yüzde uzamayı ve eğme özelliklerini çok fazla kötüleştirir, soğuk kırılğanlık yaratır, talaşlı şekillendirme kabiliyetini artırır. Fosfor, elik içinde üretim işlemlerinden kalan bir elementtir ve istenmeyen özellikleri nedeniyle mümkün mertebe yapıdan uzaklaştırılır. Kaliteli ışlah çeliklerinde maksimum fosfor miktarı %0.045, asal ışlah çeliklerinde ise %0,035' dir (kutuphanem.net 2004).

Kükürt (S)

Kükürt, eliğın kırılğanlığınını arttır. Bu nedenle de eliğın hadde işlemine tabi tutulması güçleşir. Buna karşın çelikte işlenebilme özeliğinin gerekmediğı haller dışında kükürt diğerk zararlı elementler gibi yapı içerisinde istenmeyen bir elementtir. elik içinde müsaade edilen maksimum miktarı ise en fazla %0,025-0,050 arasında sınırlandırılmıştır.

Krom (Cr)

Krom, eliğın dayanım özelliğini arttıran, fakat esnekliğı çok az bir dereceye karşı eksi yönde etkileyen bir alaşım elementidir. Krom, eliğın sıcağa dayanımını artırır. Kabuk-tufal oluşmasını önler (MKE, 1978). En önemli özelliğı ise eliğın paslanmaya karşı dayanımını arttırmasıdır. Kromun ferrit yapıcı olmasından dolayı paslanmaz çeliklerin önemli bir bölümünü oluşturan ferritik paslanmaz çelikler de Cr miktarı önemli derecede etki etmektedir.

Nikel (Ni)

Nikel, darbe tokluğunu ve ısıl işlem görmüş çeliklerde dayanımı artırır. Nikel stenitik paslanmaz çeliklerin kromdan sonra ikinci en önemli alaşım elementidir. Östenitik paslanmaz çeliklerde ki nikel miktarı %7–20 arasındadır. Nikel stenit kararlaştırıcı bir elementtir ve östenitik paslanmaz çeliklerin, adından da

anlaşılacağı gibi, oda sıcaklığında bile kafes yapısı YMK' dir. YMK kafes yapısı östenitik paslanmaz çeliklere yüksek şekillendirilebilme özelliği kazandırır (kutuphanem.net 2004).

Nikel; çeliğin dayanımını silisyum ve mangana kıyasla daha az artırır. Çelikte nikel, özellikle kromla birlikte bulunduğu zaman, sertliğin derinliklere inmesini sağlar. Krom nikelli çelikler paslanmaz, kabuklaşmaya ve ısıya dayanımlıdır. Özellikle düşük sıcaklıklarda, makine yapım çeliklerinin çentik dayanımını artırır. Nikel, ıslah ve sementasyon çeliklerinin dayanımını artırdığı gibi, istenen yapıdaki çelikler, paslanmaya ve kabuklaşmaya dayanımlı çelikler için, uygun bir alaşım elementidir (celikticaret.com 2004).

Molibden (Mo)

Molibden; çeliğin çekme dayanımını özellikle ısıya dayanımıyla kaynak edilme özelliğini artırır. Yüksek miktarda molibden, çeliklerin dövülmesini güçleştirir. Molibden, kromla birlikte daha çok kullanılır. Alaşımli çeliklerde molibden; krom nikelle birlikte kullanıldığında, akma ve çekme dayanımını artırır. Molibden kuvvetli karbür meydana getirdiğinden, hava ve sıcak iş çeliklerinde, östenitik pasana dayanımlı çeliklerde, sementasyon, makine yapım çelikleriyle ısıya dayanımlı çeliklerin yapımında kullanılır (MKE 1978). Bunlarla birlikte molibden tane büyümesini önler, sertleşebilme kabiliyetini artırır. Meneviş gevrekliğini giderir. Meneviş sıcaklığından yavaş soğumalarda bazı alaşımların tane sınırlarında karbür çökmesi meydana gelir, bu da kırılma eğilimine neden olur. Molibden bu olumsuz etkiyi ortadan kaldırır. Ayrıca molibden çeliklerin sürünme dayanımına ve aşınma direncini yükseltir. Alaşımli takım çeliklerinde önemli bir alaşım elementidir. Paslanmaz çeliklerde özellikle oyuklanma korozyonunu engellediği için korozyon direncini önemli ölçüde artırır (kutuphanem.net 2004).

Kobalt (Co)

Alaşımli takım çeliklerinde kullanılan bir alaşım elementidir. Takım çeliklerinin sıcakta sertliğini muhafaza etmesi için kullanılır (kutuphanem.net 2004).

Tungsten (W)

Aşınma direncini artıran, sıcakta sertliğin muhafazasını sağlayan bir alaşım elementidir. Özellikle hız çeliklerinde olmak üzere alaşımli takım çeliklerinde yaygın olarak kullanılan bir alaşım elementidir (kutuphanem.net 2004).

Hava çeliklerinde, takım çeliklerinde ve ıslah çeliklerinde, alaşım elementi olarak yaygın bir şekilde kullanılır. Çelikte tungstenin bulunması belirli yüzdelere kadar kaynak edilebilme özelliğine geliştirici etkiler yapar. Tungstenin karbür meydana getirmeye karşı kuvvetli bir eğilimi olup, yüksek çalışma sıcaklığında, çeliğin menevişlenip sertliğini kaybetmemesini sağladığından, sıcağa dayanımlı çeliklerin yapımında tercih edilir (celikticaret.com 2004).

Vanadyum (V)

Tane küçültme etkisi yaparak çeliklerin akma ve çekme dayanımlarını oldukça artırır. Ayrıca sertleşebilme kabiliyetini artırır, menevişleme ve ikinci sertleşmede olumlu etkileri vardır. Alaşımli takım çeliklerinde kullanım yeri olan bir alaşım elementidir. Vanadyum, tane küçültücü ve karbür yapıcı etkisi ile, mikro alaşımli çeliklerde niyobyum ve titanyum ile birlikte kullanılan bir mikro alaşım elementidir (kutuphanem.net 2004).

Vanadyum; çok düşük miktarlarda kullanıldığında çeliğin sıcağa dayanımını artırır. Vanadyum, alaşımli makine yapı çeliklerinin tane yapılarının ince olmasını ve fiziksel özelliklerinin geliştirilmesini sağlar. Aynı zamanda çelik kesici uçlarının, daha uzun zaman keskin kalmasını sağlar. Genellikle, alaşımli makine yapım çeliklerinde bulunan vanadyum miktarı %0,03-0,25 arasında değişir. Karbür yapmaya karşı kuvvetli bir eğilimi vardır. Çeliğin çekme ve akma dayanımını artırır, Makine yapım ve sıcak iş çeliklerinde özellikle vanadyum krom, hava ve makine yapım çeliklerinde Tungstenle birlikte kullanılır (celikticaret.com 2004).

Alüminyum (Al)

Alüminyum, oksijene karşı ilgisi fazla olduğu için sıvı çeliğin içindeki oksijeni gidermek için kullanılır. Çeliğin içindeki ısıl işlem ve sıcak şekillendirme

esnasında tane büyüklüğünü kontrol etmek amacıyla da kullanılır.

Bakır (Cu)

Bakır, çeliğin akma ve çekme mukavemetini artırır. Fakat elastikiyetini zayıflatır. Çeliğin kaynak edilme özelliğini etkilemez. Atmosferik korozyon direncini iyileştirmek için çeliğe ilave edilir. Çelikteki bakır miktarı %0,2 ile %0,5 arasındadır.

Azot (N)

Azot, çeliğin mukavemetini, sertliğini artırır. Talaşlı işlemini kolaylaştırır fakat çeliği kırılgan hale getirir. Alüminyumla oksijeni giderilmiş durgun çeliklerde azot alüminyumla birleşerek alüminyum nitrat partikülleri oluşturur ki bu da çeliğin tane yapısını kontrol eder ve böylelikle mukavemet ve tokluk iyileşir.

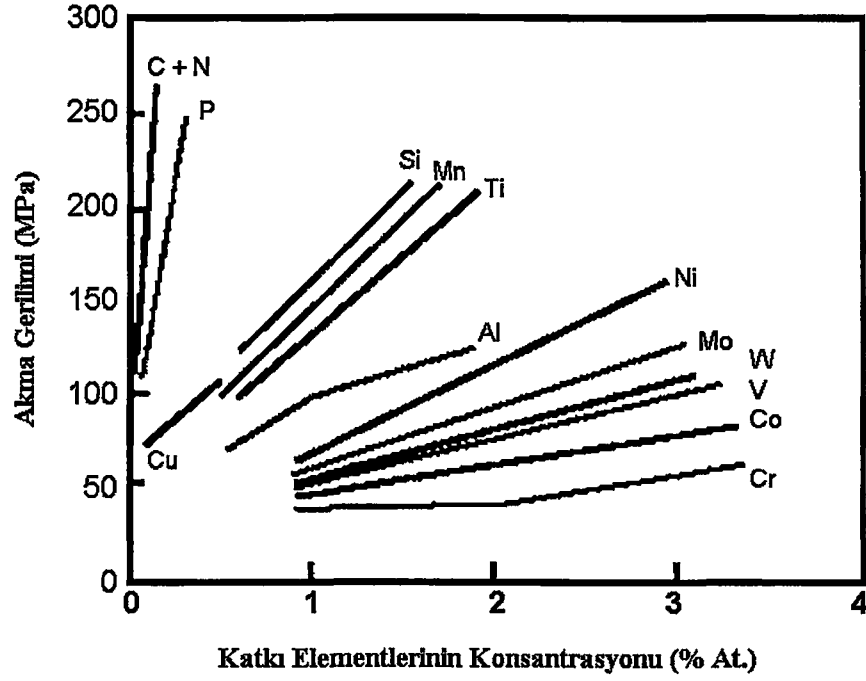
Oksijen (O)

Oksijen, kaynak çelik türlerinde daha çok bulunur. Oluşturduğu oksit kalıntıları tehlike meydana getirir.

Hidrojen (H)

Hidrojen, çelikte bulunması hiç arzu edilmeyen zararlı bir elementtir. Çeliğe, kullanılan hurdadan, katkı maddelerinden veya atmosferdeki nemden girer. Çeliğin katı içyapısı içinde oluşan gazı kılcal çatlaklar yaparak çeliğin yorulma direncini azaltır. Vakum altında gaz giderme işlemiyle üretilmiş çelikler bu açıdan büyük avantaj ve güvenilirliğe sahiptir (KOSGEB, 1989).

Alaşım elementlerinin en önemli özelliği belli bir fazın oluşumunu geliştirmek veya onu kararlı hale getirmektir. HMK kafesli çeliklerin içerisinde bulunan veya daha sonradan ilave edilen alaşım elementi çeşitlerinin ve bu elementlerin değişik oranlarının çeliğin akma dayanımına etkisi Şekil 3.4'de gösterilmiştir.



Şekil 3.4 HMK Kafesli Çelikler İçin Alaşım Elementi Miktarının Akma Dayanımına Etkisi
(matse101.mse.uiuc.edu).

3.4 Malzemelerde Mukavemet Arttırma Yöntemleri

Metallerin mukavemetinin yükseltilmesi, metali koparmak veya kırmak için daha fazla kuvvet uygulama gereğinin doğmasıdır. Metallerde mukavemet, normal olarak çekme deneyi veya metallere uygulanan sertlik ölçme yöntemlerinden biri ile ölçülür. Bu deneylerin dışında sürünme veya yorulma durumlarındaki mukavemetlerin ölçülmesi de mevcuttur (Yüksel 2001).

Mukavemeti artırabilmek için çeşitli sertleştirme yöntemleri vardır (Yüksel 2001):

- 1. Alaşımlama:** Asal yer veya ara yer yabancı atomlarının katılması, yani katı eriyik sertleştirme, alaşım sertleştirme.
- 2. Soğuk şekillendirme:** Dislokasyon yoğunluğunu artırma ve dislokasyonların birbirlerini engellemesini sağlama, yani pekleştirme.
- 3. Tane inceltme:** İnce taneli malzeme üreterek tane ve faz sınırlarının dislokasyon hareketlerine engel olmasını sağlamak, yani tane inceltme, tane sınırları sertleştirme.

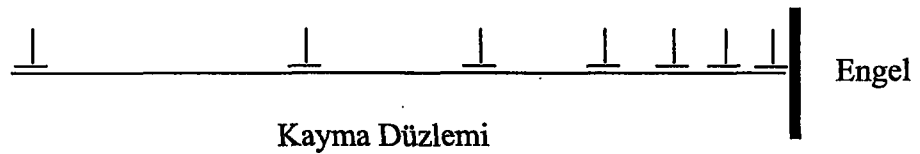
4. Ayrışım sertleştirme: Metal içinde homojen dağılmış çok küçük parçacıklar üretilmesi ve onların dislokasyon hareketlerini zorlaştırması, yani ayrışım sertleştirme (katı çökelti sertleştirme veya yaşlandırma sertleştirme), dispersiyon sertleştirme, parçacık sertleştirme.

5. Dönüşüm sertleştirme: Çelik malzemelere sıkça uygulanan bir sertleştirme yöntemidir. Yabancı atomlarla aşırı doymuş bir östenit kafesinin ferrit'e dönüşmesi esnasında ayrışımın engellenmesi, denge dışı ve şekillenme kabiliyeti kısıtlanmış bir martenzit kafesinin ortaya çıkması esasına dayanır. Martenzit sertleştirme veya su verme.

6. Yüzey ve kabuk sertleştirme: Çelik malzemelerin yüzey sertleştirme bölgesel dönüşüm sertleştirme. Kabuk sertleştirmesinde bölgesel alaşımlama da devreye sokulmuştur.

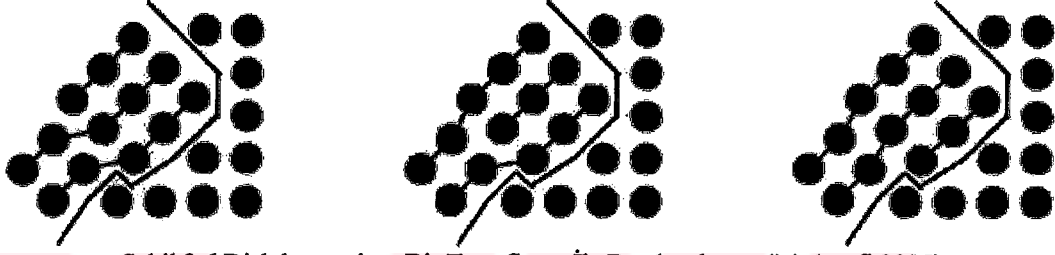
3.4.1 Tane İnceltme

Her tane sınırı (bunlara faz sınırları da dahil edilebilir), kayma düzlemlerinin önüne çekilmiş set gibidir. Hareket halindeki bir dislokasyon karşısına çıkan bir tane sınırında son bulur. Şekil 3.5' de bu durum şematik olarak gösterilmiştir. Çünkü kaymaya zorlanmış bir kayma düzlemi komşu tanenin kayma düzlemi ile aynı düzlem içerisinde olmayabilir; burada ya seviyesi ya da açısı farklıdır. Bu şekilde ne kadar tane sınırı var ise o kadar da engel var demektir. Kısacası ne kadar tane sayısı var ise veya malzeme ne kadar ince taneli ise o derece daha mukavemetlidir. Bu durumu en iyi şekilde Hall-Petch formülü ifade etmektedir (Yüksel 2001).



Şekil 3.5 Bir Engel (Tane Sınırı, Parçacık vb) Ötünde Dislokasyon Yığılması (Yüksel 2001).

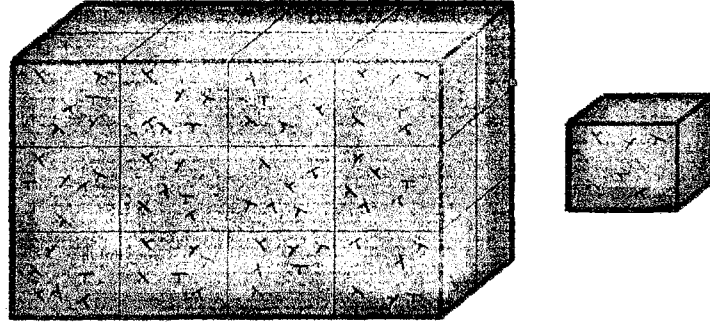
Yeterince gerilim ve termal enerji verildiğinde, dislokasyonlar kristalin taneleri boyunca kolayca ilerleyerek tanenin deformasyonuna sebep olacaktır. Ancak dislokasyonlar tane sınırına ulaştığında gidecek bir yeri yoktur. Diğer bir deyişle tane sınırı dislokasyonları durdurur. Dolayısı ile bir malzemenin dayanımını arttırmanın en kolay yolu taneleri oldukça küçük yapmaktır. Bu da tane sınırı alanını arttırır. Küçük taneler de yüzey/hacim oranı yüksektir ve daha fazla dislokasyon tutulur. Bu durum Şekil 3.6' da şematik olarak gösterilmiştir (isis.hut.fi 2005).



Şekil 3.6 Dislokasyon' un Bir Tane Sınırı İle Durdurulması (isis.hut.fi 2005).

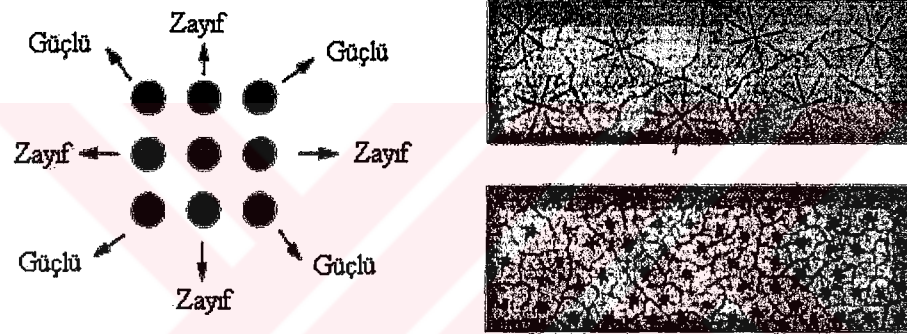
Şekil 3.7' de iki kare tane gösterilmektedir. Basit olması için taneler dikdörtgen prizma olarak gösterilmektedir. Her bir prizma kübik ünitelerden oluşmuştur ve her bir ünite tam olarak 6 tane dislokasyon içerir. Büyük bir tane için 24 tane küp ünitesi vardır. Küçük tane için ise bir tane küp ünitesi vardır. Büyük tane 144 tane dislokasyon içerecektir. Küçük tane ise 6 dislokasyon içerecektir. Dolayısı ile küçük tane daha güçlüdür. Büyük tanede dislokasyon 4 küp kadar durmadan ilerleyecektir. Burada plastik deformasyon aşırı bir şekilde olmasını sağlar. Küçük tanede ise dislokasyon bir kare üniteden fazla ilerleyemez. Küçük taneler metalin dayanımını başka bir şekilde arttırırken her bir tane içinde atomların hareket etmesini kolaylaştıracak tercih edilecek düzlemler vardır. Bunlar kayma düzlemi olarak bilinir. Eğer uygulanan gerilim kayma düzlemine rast gelirse dislokasyonlar çok kolay hareket eder. Eğer uygulanan gerilim kayma düzlemine dik ise oldukça zor ilerleyecektir. Dolayısıyla her bir tane değişik doğrultularda zayıftır

Ancak birden fazla tane değişik yönlerde yönlenmiş ise mikroskobik yönlenme dayanım için averaj hale gelecektir. Bu da her yönde eşit dayanım sağlayacaktır (isis.hut.fi 2005).



Şekil 3.7 Dislokasyon ve Tane Sınırı Yoğunluğu (isis.hut.fi 2005).

Şekil 3.8’ de uygulanan yük doğrultusunda malzemenin ve tanelerin uygulanan kuvvete dirençleri gösterilmiştir.

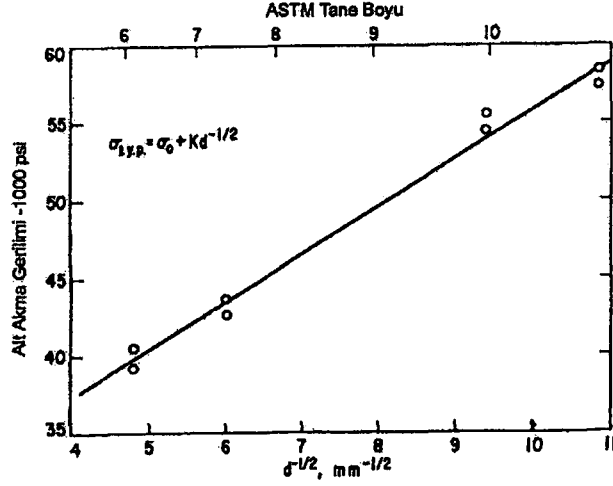


Şekil 3.8 Gerilim Dağılımı (isis.hut.fi 2005).

Küçük tane malzemenin akma dayanımını, gerilime bağlı akma direncini ve şekil verilebilme özelliğini arttıracaktır.

3.4.2 Tane Boyutunun Temel Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi

Ferit, tane boyutu ve düşük karbonlu çeliklerin akma dayanımı üzerine büyük bir etkiye sahiptir. Aynı karbon oranına ve ısıl işlem türüne göre ince taneli düşük karbonlu çelikler, kaba taneli çeliklerden daha yüksek dayanıma sahiptirler. Şekil 3.9, tavlanmış yumuşak çeliğin akma dayanımının ASTM tane boyutu 6'da 40 ksi' den ASTM tane boyutu 11'de 58 ksi' ye nasıl yükseldiğini göstermektedir (Lawrence ve Vlack 1994).



Şekil 3.9 Ferrit Tane Boyutunun Tavlanmış Yumuşak Çeliğin Dayanımı Üzerine Etkisi (Petch).

Dayanımdaki bu büyük yükselmenin nedeni, düşük sıcaklıklarda tane sınırlarının dislokasyon hareketlerine engel olarak davranmalarından kaynaklanmaktadır. Akma dayanımı ve tane boyutu arasındaki sayısal ilişki Hall-Petch tarafından aşağıdaki eşitlikle verilmiştir.

$$\sigma_y = \sigma_0 + kd^{-1/2} \quad (3.1)$$

Burada σ_y : akma dayanımı, σ_0 : kafes sürtünme faktörü, k : deney sonucu elde edilen bir malzeme sabiti ve d ortalama tane çapıdır. Bir metal veya alaşım gerilim altında iken dislokasyonlar tane sınırlarını geçmeye zorlanamazlar ancak tane sınırlarında yığılarak yoğunlaşırlar. Kaymanın yeni kaynakları komşu tanelerde uygulanan gerilimle oluşturulur. Bu nedenle metal ve alaşımlarda yüksek bir tane sınırı yoğunluğu yüksek bir akma dayanımı sağlar (Lawrence ve Vlack 1994).

Tane büyüklükleri birbirinden farklı olan iki çeliğin kimyasal bileşimleri aynı olsa da, mekanik özellikleri büyük farklılıklar gösterir (Weissbach 1998).

İnce taneli yapılar daha yüksek mukavemet ve uzama miktarı ile iyi bir çentik darbe mukavemetine sahiptirler. İri taneli yapılar ise oda sıcaklığında düşük çentik darbe mukavemeti gösterirler. Mekanik özelliklerin tane büyüklüklerine göre farklılık göstermesinin sebebi, tane sınırlarıdır. Bu bölgelerde atomların düzenli durumları bozulmuştur; yani atomların birbirlerini bağlayan kuvvetleri

kristal içerisine göre daha zayıftır. Sadece iri tanelerden oluşmuş 1 mm² kesitli bir tel düşünelim. Bu telin tane sınırlarından kopması çok normaldir. Herhangi bir tanenin ortasından geçecek kopma düzlemi de aynı büyüklükte olurdu; ancak tane içerisindeki atomlar daha sıkı bir şekilde bağlanmış olduğundan, bu tip kopma imkansızdır (Weissbach 1998).

İnce taneli malzemedan yapılmış bir tel ise, çok başka bir davranış gösterir ve tanelerin tam ortasından kopar. Şayet kopma tane sınırları boyunca olsa idi, kopma yüzeyi daha geniş olurdu; yani koparma için daha büyük bir kuvvet gerekirdi. Bu tip bir kopma olmaz; zira tanelerin şekil değişimi kayma (translasyon) ile başlar. Bunun sonucu büzülme (tel bölgesel olarak aşırı incelik) ve uzama olayları meydana gelir. Böylece soğuk şekil verme neticesi soğuk sertleşme hasil olur. Daha küçük olan kesitine rağmen tel, ilk durumuna göre daha fazla kuvvet kaldırabilir. En sonunda ise tel büzülme bölgesinden kopar. İri taneli yapının şekil değiştirmeden kopmaya eğilimi vardır. İnce taneli yapı kopmadan önce şekil değiştirir. Soğuk sertleşme ince taneli bir yapıda belirli ölçülerde kopmayı engelleyebilir (Weissbach 1998).

3.4.3 Tane Büyümesi

Yapılan tez çalışmasında sıcaklık ve bekletme süresine bağlı olarak AISI 1030, AISI 8620 ve AISI 1016 çeliklerinin tane boyutlarının artması sağlanmıştır. Tane büyümesinin mekanizması ise;

Yüksek sıcaklıklarda uygulanan tavlama işlemi sonucunda, yeniden kristalleşme işlemi ile iri taneli bir yapı meydana gelir. Piyasada satılan metallerin tane sınırları arasında bazı metalik veya metal olmayan yabancı artıklar bulunabilir. Yüksek sıcaklıklardaki ısıtma işlemlerinde bu yabancı kalıntılar çözünerek esas metalin kristal kafes yapısına girer. Bu şekilde sınır tabakaları ortadan kalktığından aynı özellikteki taneler yan yana gelir ve küçük taneler zamanla büyük tanelere dahil olur (Weissbach 1998).

İri tane, malzemeyi yüksek sıcaklıkta ısıtma (aşırı ısıtma) veya yüksek sıcaklıkta uzun süre bekletme (aşırı bekletme) sonucu oluşur.

Yapı içerisinde yüksek sıcaklıklarda bile çözünmeyen maddeler (yabancı kristaller) tane sınırlarına yerleşmişse tane büyümesi önlenir. Yüksek sıcaklıklarda kullanılan ısıya dayanıklı malzemeler ve kaynak konstrüksiyonlarında kullanılan ince taneli çelikler bu tip bir yapıya sahip olmalıdırlar. Tane büyümesini azaltıcı etki yapan alaşım elementlerinin en önemlileri Al, Mo ve Ti' dir (Weissbach 1998).

3.4.4 Alaşım Elementlerinin Tane Büyümesine Etkileri

Tane büyümesini sınırlandırılmasında en önemli element vanadyumdur. Vanadyumun çelik içinde çok düşük oranlarda (%0,1) kullanımı bile sertleştirme işlemi sırasında tane büyümesini durdurmak için yeterlidir. Bunun nedeni vanadyumun sertleştirme sıcaklıklarında homojen dağılmış karbürler ve nitrürler şeklinde bulunmasıdır. Bu tür karbürleri veya nitrürleri katı eriyik içine alabilmek için yüksek sıcaklığa çıkarmak gerekir. Bu nedenle alışılagelmiş sertleşme sıcaklıklarında vanadyum bileşikleri tane büyümesi için engel teşkil eder. Eğer sıcaklık normal değerden daha yüksek değere çıkartılırsa vanadyum bileşikleri çözümlenebilir. Ancak bu durumda çeliğin tane boyutunun büyümesi söz konusu olabilir. Böyle bir durumda çeliğin darbe mukavemeti başta olmak üzere mekanik özelliklerinde düşme görülür.

Ti ve Nb' da vanadyuma benzer etkiler gösteren iki elementtir. Yüksek hız çeliklerinde ve diğer alaşımlı takım çeliklerinde W, Mo çift karbürleri de VC ve VN' ye benzer şekilde tane büyümesini engeller.

Yüzey sertleştirmede kullanılan ince taneli çeliklerin üretiminde istenilen sertleştirme etkisi ergimiş metale Al ilavesi ile sağlanır. Bunun için uygulanan pratik yöntem, önce oksijen miktarını belli bir seviyeye indirmek ve sonra çeliğe azot miktarına bağlı olarak Al ilave etmektir. Çelik soğuk iken Al-N partiküllerinin dağılımı sağlanır ve çeliğin normal sertleştirme sıcaklığında tane büyümesi bu partiküller tarafından engellenir (koumakina2001.8m.com 2004).

4. ÇELİKLERE UYGULANAN ISIL İŞLEM ÇEŞİTLERİ

Isıl işlem, bir malzemenin özelliklerini veya iç yapısını değiştirmek amacıyla, o malzemeye belirli bir sıcaklık-zaman programı dahilinde uygulanan ısıtma ve soğutma işlemleri sırasındır (Yüksel 2001). Bir diğer tanıma göre ise; ısıl işlem, metal veya alaşımlarına istenilen özellikler kazandırmak maksadı ile katı halde uygulanan bir veya daha çok sayıdaki kontrollü ısıtma ve soğutma işlemleridir.

Çeliklerin büyük çoğunluğu, içerdiği elementlere bağlı olarak ısıl işlemlere karşı duyarlıdır. Kimyasal bileşimin yanı sıra uygulanan ısıl işlemler sonucunda istenen sertlik, mekanik ve fiziksel özellik değerlerine ulaşılabilir. Isıl işlemler çok çeşitli olup hem hammaddeye, hem de bitmiş ürünlere uygulanabilir. Genel olarak çelik hammaddelere uygulanan ısıl işlemler, ıslah, normalizasyon, yumuşatma tavlaması, küreselleştirme tavlaması, izotermik tavlama ve soğuk kesilebilirlik tavlaması olarak değerlendirilebilir (cemtas.com.tr/yeni/fason_isl3.htm 2004).

Çeliklere uygulanan ısıl işlemleri iki ana grup altında sıralanabilir.

I. Çelik Tav İşlemleri

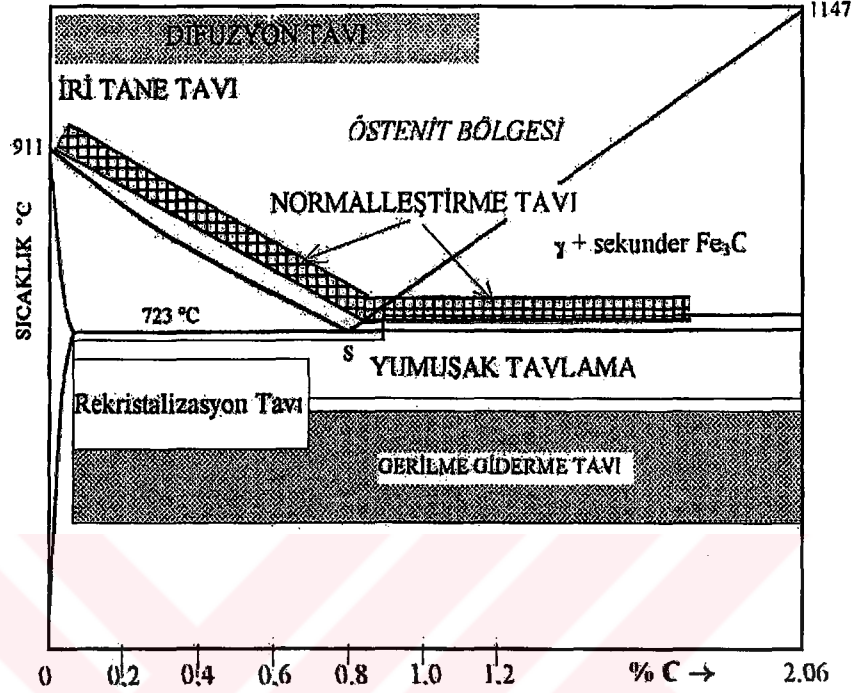
- Gerilim Giderme Tavlama
- Rekristalizasyon Tavlama
- Yumuşak Tavlama
- Normalleştirme Tavlama
- Tane İrileştirme Tavlaması
- Difüzyon Tavlama

II. Sertleştirme İşlemleri

- Alaşım Sertleştirme
- Soğuk Sertleştirme
- Tane İnceltme
- Ayrışım Sertleştirme
- Dönüşüm Sertleştirme

– Yüzey ve Kabuk Sertleştirilmesi

Çeliklere uygulanan ısı işlemlerin demir-karbon faz diyagramı üzerindeki bölgeleri Şekil 4.1 de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Demir-Karbon Faz Diyagramında Çelik ve Tav Sıcaklıkları Bölgeleri (Yüksel 2001).

Isıl işlemlerle ilgili bu temel bilgile ışığında çelik ısıl işlemlerinin iki temel türde olduğu görülmektedir.

1) Ötektoid sıcaklığı (A_1) altında yapılan ısıl işlemler:

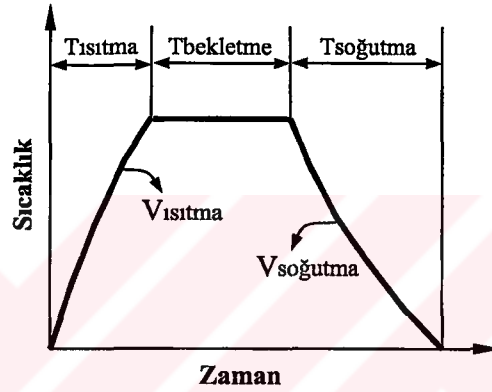
Bu ısıl işlemler gerilim giderme, küreselleştirme, temperleme, yeniden kristalleştirme işlemleridir.

2) Ötektoid sıcaklığının üstünde yapılan ısıl işlemler:

Normalleştirme, su verme, homojenleştirme ve tavlama bu tür işlemlerdendir. Bu ısıl işlemlerde çelik ötektoid sıcaklığın üstünde ısıtılarak tamamen veya kısmen östenit'e dönüştürüldükten sonra çeşitli hızlarda soğutularak az veya çok dengeden sapan faz ve yapılar elde edilir. Birinci tür ısıl işlemlerde önemli olan soğutma hızıdır (Esen 2000).

4.1 Isıl İşlemlerin Genel Grafiği

Isıl işlem, metal malzemelerde katı halde sıcaklık değişimleri ile bir ya da birbirine bağlı birkaç işlemle, amaca uygun özellik değişimleridir. Isıl işlemde, parçaların belirli bir sıcaklığa ısıtılması "ısıtma", bu sıcaklıkta uygun süre tutma "bekleme" ve belirli bir programa uygun olarak sıcaklığın oda sıcaklığına düşürülmesi "soğutma" ile üç kademedeki özellik değişimleri sağlanır. Derin soğutmalı ısıl işlem türü dışında, her tür ısıl işlem için geçerli olan bu süreç Şekil 4.2'de belirtilmiştir (Bucak 2000).



Şekil 4.2 Isıl İşlemlerin Genel Grafiği (Said 2003).

Bir ısıl işlem üç kısımdan oluşur. Bunlar:

- Malzemenin uygun bir sıcaklığa ısıtılması,
- Malzemenin belirli bir sıcaklık aralığında belirli süre tutulması,
- İstenilen sıcaklığa kadar ısıtılmış ve bu sıcaklıkta belirli süre tutulan malzemenin uygun bir soğutma hızı ve ortamında soğutulması.

Çeliklerin ısıl işlemlerinin belirlenmesinde önemli olan temel parametreleri şu şekilde sıralamak mümkündür (Sadak 2000).

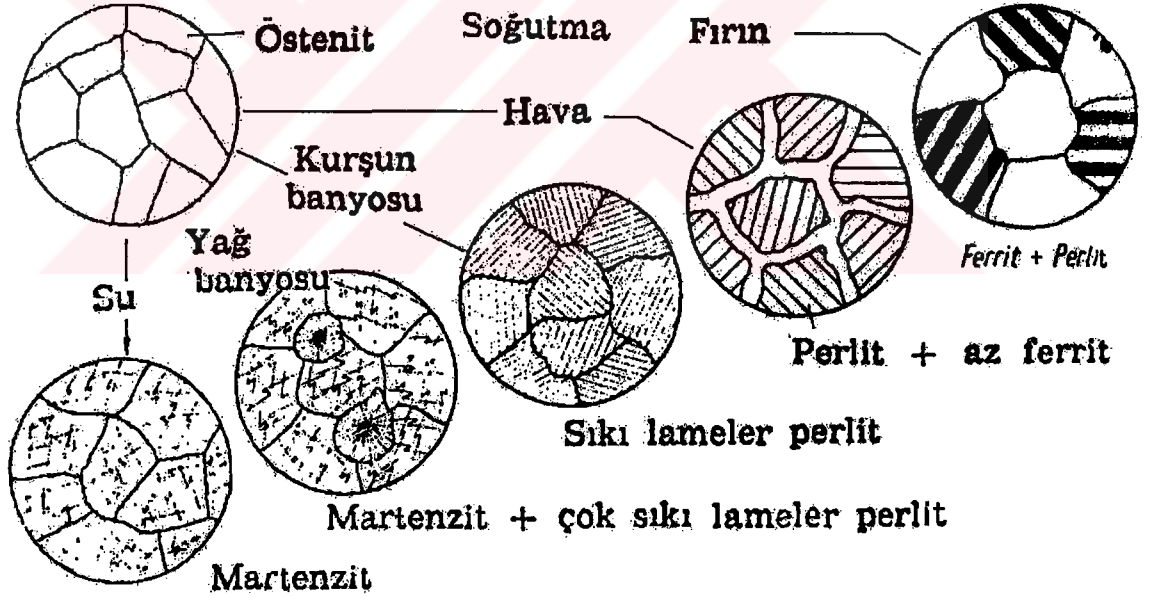
- Çelikteki karbon oranı (%C)
- Diğer alaşım elementlerinin yüzdesi
- Isıl işlemsiz mekanik özellikler
- Isıl işlem sonrası elde edilmesi tasarlanan mekanik özellikler
- Çeliğin kullanım ortamı

- Kullanım alanındaki maruz kalacağı zorlamalar (Yükün periyodu, burma, çarpma v.s. gibi).

Çelikler için ısıtma işlemi temelinde östenitleştirme ile başlanır. Östenitleştirme işlemi için çelik, alt kritik sıcaklık sınırı olan A_1 sıcaklığının üzerinde bir sıcaklığa ısıtılır. Çeliğin belirlenen sıcaklığa kadar ısıtılmasında seçilen ısıtma hızı, iç gerilim bulunan malzeme durumu ve çelik malzemenin kesimine bağlı olarak farklılık göstermektedir (Ulu 2004).

Çeliklere uygulanan tüm temel ısıtma işlemleri, östenit fazının dönüşümü ile ilgilidir. Dönüşüm işlemleri sonucu oluşan mikro yapı türü ve bileşimi çeliğin mekanik ve fiziksel özelliklerini etkiler.

Isıtma işlemine tabi tutulmuş olan bir malzemenin çeşitli soğutma hızları ve ortamlarına göre iç yapısındaki değişimleri Şekil 4.3' de gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Östenitin Soğuma Hızına Bağlı Olarak Yaptığı Dönüşümler (Weissbach 1998).

4.2 Isıl İşlemin Malzeme Özellikleri Üzerine Etkisi

Yöntem ayırımı yapılmaksızın genel olarak, metal ve alaşımlarında ısıl işleme değiştirilebilen özellikler, şu şekilde özetlenebilir (web.utk.edu 2004).

Herhangi bir yöntemle sertleştirilmiş yapı yumuşatılabilir. Malzemede talaşlı ve talaşsız işlenebilirlik artırılır. Malzemenin iç yapısında, daha homojen ve ince yapıli taneler elde edilebilir.

Soğuk şekillendirme ile şekillendirme doğrultusunda uzamış kristaller, daha küçük ve küresel forma dönüştürülebilir. Malzeme yumuşatılır ve tekrar soğuk şekillenebilirlik özelliği kazandırılır. Kritik şekil değiştirme derecesinin altında soğuk şekillendirilmiş malzemelerde, pek az uzamış taneler, küresel biçime kavuşturulabilir ve şekillendirme öncesi özellikler, toparlanma ile yeniden kazandırılabilir.

Talaşlı şekillendirilebilmeyi kolaylaştırmak amacıyla, tane kabalaşması sağlanabilir. Düşük karbonlu çeliklerde, östenitik alandan uygun soğutma yapılarak, ferrite nazaran perlit oranı artırılarak, yani perlitleştirme yaptırılarak talaşlı şekillenebilirlik iyileştirilebilir.

Çeliklerde östenit stabilleştirilmesi yapılmak suretiyle, kalite yükselmesi sağlanır, soğuğa ve korozyona dayanımı artırılabilir. Emaye, laklama ve benzer yüzey kaplama işlemleri için malzeme yüzeyini hazırlamak amacıyla, parlak yüzey sağlanabilir. Yüzeye yabancı atom difüzyonu ile ya da dayanıklı bir oksit tabakası oluşturarak, atmosfere ve diğer korozif ortamlara karşı korozyon direnci artırılabilir.

Katı halde dönüşüm meydana getirebilen alaşımlarda, yavaş soğumada meydana gelebilecek yapıların hızlı soğutma yapılarak engellenmesi ve tamamen farklı yeni yapıların oluşturulmasıyla (örneğin, çeliklerde martensitik ya da beynitik yapı teşekkülü), yüzeyde ya da tüm malzeme kesitinde önemli ölçüde sertlik artması sağlanabilir.

4.3 Isıl İşlem Çeşitleri

4.3.1 Tavlama

Tavlama, malzemenin solidus eğrisi altındaki belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılmasına, bu sıcaklıkla bekletilmesine ve sonradan da soğutulmasına denir. Tavlamanın gayesine göre kesin belirlenmiş sıcaklıklar ve süreler tespit edilmiştir.

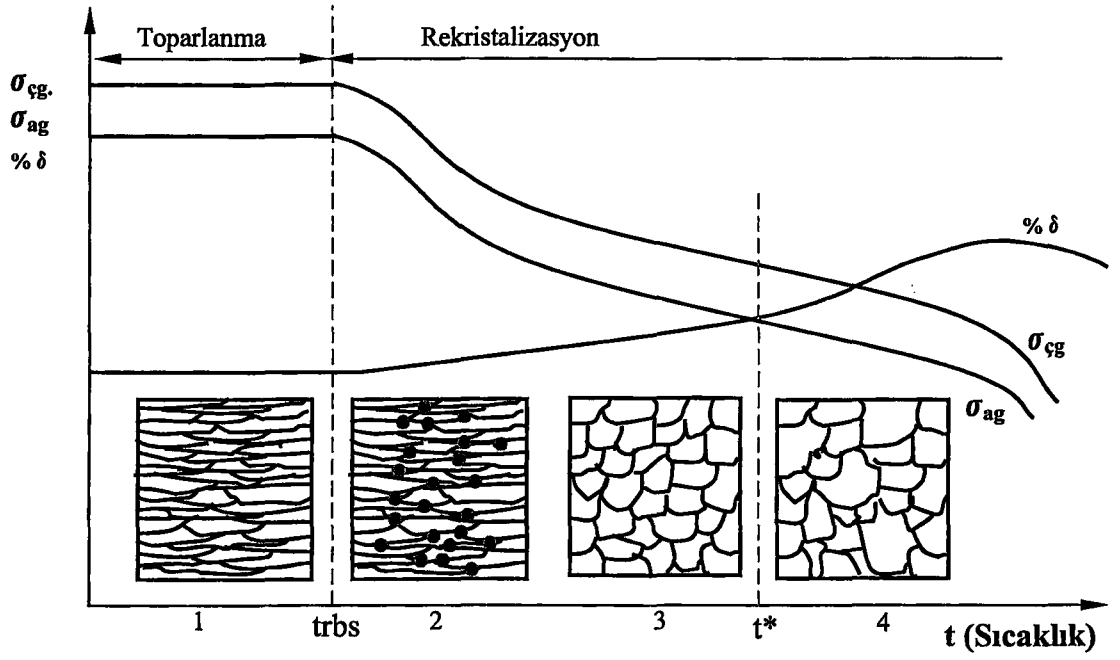
Tavlamada atmosfer fırınları, tuz banyoları veya kurşun potalar kullanılabilir. Takım çeliklerin tavlama sırasında koruyucu atmosfer fırınlar kullanılır. Tavlama sıcaklığında bekletme süresinden sonra malzeme fırın içerisinde saatte 8-20 °C' lik hızla 550 °C' ye veya daha alt sıcaklıklara soğutulur. 550 °C' nin altında takım çeliklerinin çoğu için soğuma hızı artık kritik olmadığından parçalar dışarı alınarak havada soğutulabilir (Çiğdemoğlu 1972).

4.3.2 Rekristalizasyon

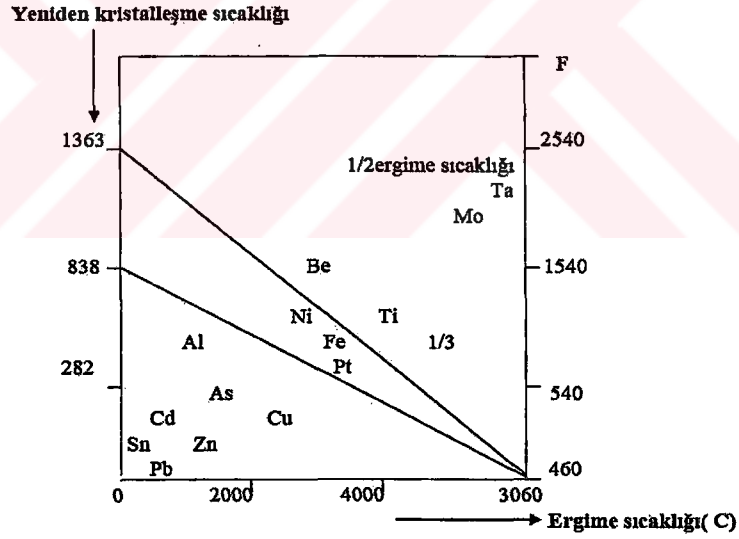
Malzemenin soğuk şekil değiştirme sonucunda bozulan taneleri yenilemek ve şekil değişim etkilerini ortadan kaldırmak için, malzeme belirli bir sıcaklıkta tavlama yapılır. Tavlama sıcaklığı şekil değişim derecesine ve tavlama süresine bağlıdır. Bu tavlama işlemine "rekristalizasyon" denir (cmsmakina.com).

Soğuk şekil verme sonucu sertleşen malzemenin özelliklerini (Yüksek dayanım, düşük sertlik, tokluk v.s.) başlangıç durumuna getirmeyi amaçlar. Bir çok uygulamada örneğin derin çekme işleminde ara tav olarak da yapılır. Böylece daha sonraki şekil verme kademeleri için gerekli süneklik malzemeye tekrar kazandırılır. Bu ısıl işlem şekil değiştirme oranlarına ve diğer etmenlere bağlı olarak 550 °C' nin üzerinde ve genellikle 600-700 °C de gerçekleştirilir (Şişman 1999).

Bu işlem sonucunda iç yapı yeniden kristalleşerek eş eksenli taneler meydana gelir. Oluşan eş eksenli taneler daha önce deformasyon yönünde uzamış tanelerin yerini alır. Bu esnada dislokasyon yoğunluğunun azalmasıyla da malzeme başlangıçtaki sünekliğine kavuşur. Rekristalizasyon işleminin şematik olarak işlem basamaklarını gösteren grafik Şekil 4.4' de bazı metaller için rekristalizasyon sıcaklığını tayin etmek için kullanılan şema ise Şekil 4.5' de verilmiştir.



Şekil 4.4 Rekristalizasyon İşleminin Şematik Gösterimi (Said 2003).



Şekil 4.5 Bazı Metaller İçin Yeniden Kristalleşme ve Ergime Sıcaklıkları (cmsmakina.com).

Rekristalizasyon sıcaklığının hesaplanması;

$$T_{rk} \approx \alpha \cdot T_{er} \quad (4.1)$$

Burada;

T_{kr} = Rekristalizasyon sıcaklığı

T_{er} = Metalin eğrime sıcaklığı

α = Saf metaller için (0,1-0,2)

Alaşımalar için ise (0,4-0,6)

Genellikle rekristalizasyon sıcaklığı, yaklaşık olarak ergime sıcaklığının yarısı veya bunun altındaki bir sıcaklık seçilir.

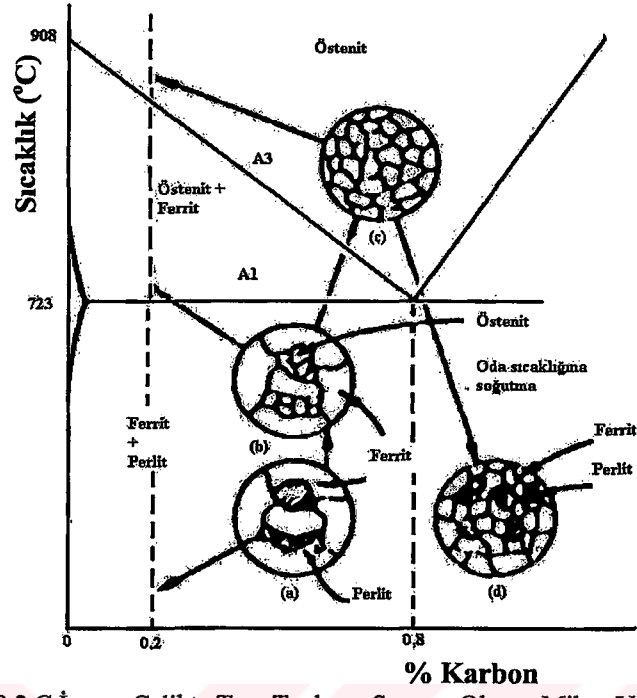
4.3.3 Tam Tavlama

Bu tür tavlama, çeliğin uygun sıcaklıkta ısıtılmasını ve faz dönüşümleri için yavaş soğutulması işlemlerini içerir. Soğutma işlemi oda sıcaklığına kadar devam eder (soğutma genellikle fırın içerisinde gerçekleşir). Tam tavlama ısı işlemi için gerekli grafik Şekil 4.6' da gösterilmiştir.

Tam tavlama, taneleri küçültmek, sertlik düşürmek, işlenebilirliği arttırmak, elektrik ve manyetik özellikleri geliştirmek için yapılır. Bu tezin amaçları doğrultusunda tane boyutu ayarlaması yapmak için tam tavlama işlemini kullanılmıştır.

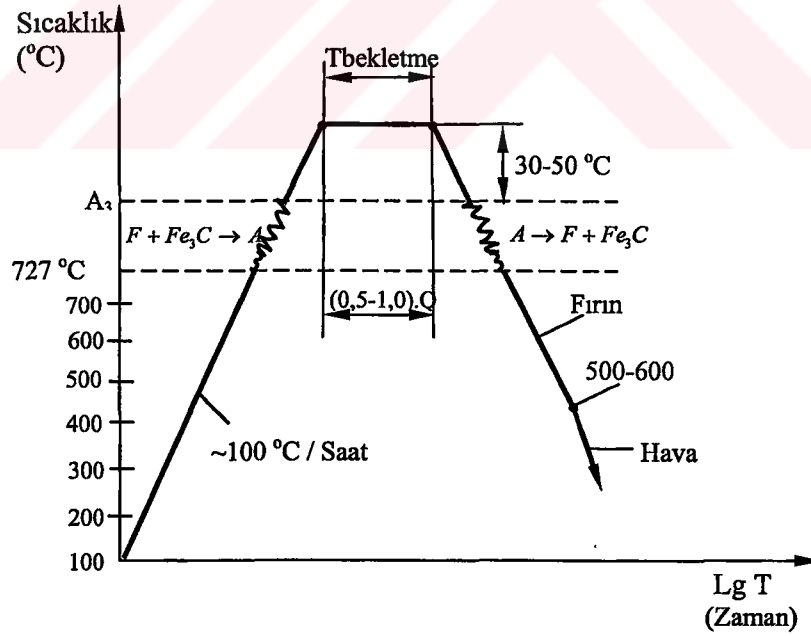
Ötektoid altı çelikler tam tavlama için A_3 (üst kritik) sıcaklığının 10–20 °C üzerinde ısıtılır. Faz dönüşümü tamamlandıktan sonra fırında yavaş soğutulur. Soğuma hızı, çelikler için 30–100 °C/saat, sade karbonlu çelikler için 200 °C/saat alınır (Sadak 2000).

Bu çeliğin A_1 (alt-kritik) sıcaklığına kadar ısıtılmasıyla tanelerinde değişiklik görülmez (Şekil 4.6). A_1 (alt kritik) sıcaklığın hemen üzerinde perlit küçük taneli östenit' e dönüşür. Ferrit ise değişmez. Çelik bu sıcaklıktan soğutulursa taneler yine küçülmez, ısıtma işleminin A_3 (üst-kritik) sıcaklığına kadar devam edilmesiyle kaba ferrit taneleri küçük östenit tanelerine dönüşür. A_1 (üst-kritik) sıcaklığının 10-20°C kadar üzerinde ise mikro yapı tamamen küçük taneli östenit olur. Fırın içerisinde oda sıcaklığına kadar yavaş soğutmayla küçük östenit taneleri küçük ferrit ve perlit bölgelikleri oluşturur. Şekil 4.6' da ötektoid altı çeliğin tam tavlama ısı işlemi ile tanelerinin küçültülmesi şematik olarak gösterilmiştir.



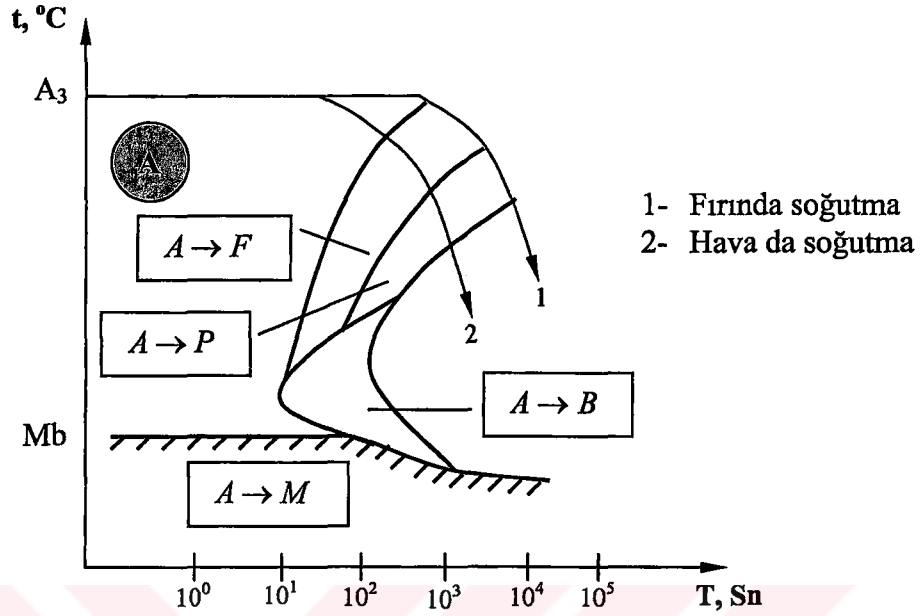
Şekil 4.6 % 0,2 C İçeren Çelikte Tam Tavlama Sonucu Oluşan Mikro Yapı Değişiklikleri (Sadak 2000).

Ötektoit altı çelikler için tam tavlama işleminin genel grafiği Şekil 4.7' de gösterilmiştir.



Şekil 4.7 Ötektoit Altı Çelikler (< %C 0,8) İçin Tam Tavlama İşleminin Genel Grafiği (Said 2003).

Ötektoid altı çelikler için tam tavlama ısıl işleminin termokinetik TTT diyagramı Şekil 4.8' de gösterilmiştir.



Şekil 4.8 Ötektoid Altı Çeliklerde Tam Tavlama İşleminin TTT Diyagramı (Said 2003).

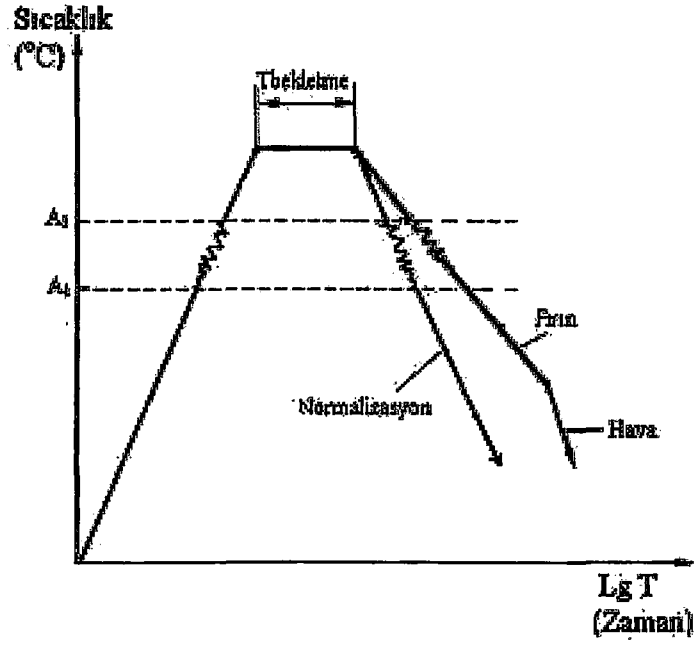
Şekil 4.8' de östenitleme bölgesinde ısıl işleme tabi tutulan çeliğin soğutma durumuna göre östenitin diğer katı fazlara dönüşümleri gösterilmiştir.

Burada; A- Östenit, F- Ferit, P- Perlit, B- Beynit ve M- Martenziti ifade etmektedir.

Ötektoid üstü çeliklere tam tavlama işlemi genellikle uygulanmaz. Bu tip çeliklerde, yavaş soğutma neticesi, tane sınırlarında sementit ağı oluşur. Sementit sert ve kırılıgandır. Sementit'i kesici takımlar kesemeyip, kopartır. Dolayısıyla mekanik işlemede arzu edilmeyen bir yüzey kalitesi oluşur. Bunun için ötektoid üstü çeliklere tam tavlama yerine küreselleştirme işlemi yaygın olarak uygulanır.

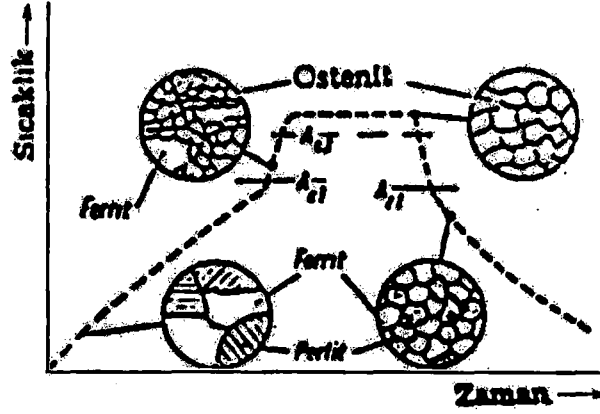
4.3.4 Normalleştirme Tavlaması (Normalizasyon)

Normalizasyon tavlaması, haddelenmiş, dövülmüş, çekilmiş, iri taneli ve eş yönlü yapıların düzelmesi, malzemenin her zaman yeniden kazanabileceği özelliklere (çekme dayanımı, süneklik v.b.) tekrar dönmesi işlemidir. Şekil 4.9' da normalizasyon işleminin genel grafiği şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.9 Normalizasyon İşleminin Genel Grafiği (Said 2003).

Normalizasyon işlemi esnasında meydana gelen iç yapı değişimleri; ötektik altı çelikler A_{C3} üzerinde östenitten meydana gelirler. Östenitik yapı aniden oluşmaz. A_{C1} üzerinde perlit kaybolur. Perlit içersindeki lameller $\alpha \rightarrow \gamma$ dönüşümüne uğrarlar, östenit karbon çözüdürebildiği için, tabakalar arasında sementit lamellerini çabuk eriten çok küçük östenit taneleri teşekkül eder. Oluşan östenit kristalleri, tane büyümesine uğrar. Yapıdaki ferrit miktarı da zamanla azalır ve neticede A_{C1} sıcaklığın üzerinde yapı sadece ince taneli östenitten meydana gelir. Taneler zamanla irileşmeye başlayacaktır. Bu nedenle normalizasyon için derhal A_{C1} altında soğutulmaktadır. İnce taneli östenit soğutma sonucu gene ince taneli olan Ferrit + Perlit haline dönüşür (Kayalı 2004). Bu durumun grafiği Şekil 4.10' da gösterilmiştir.

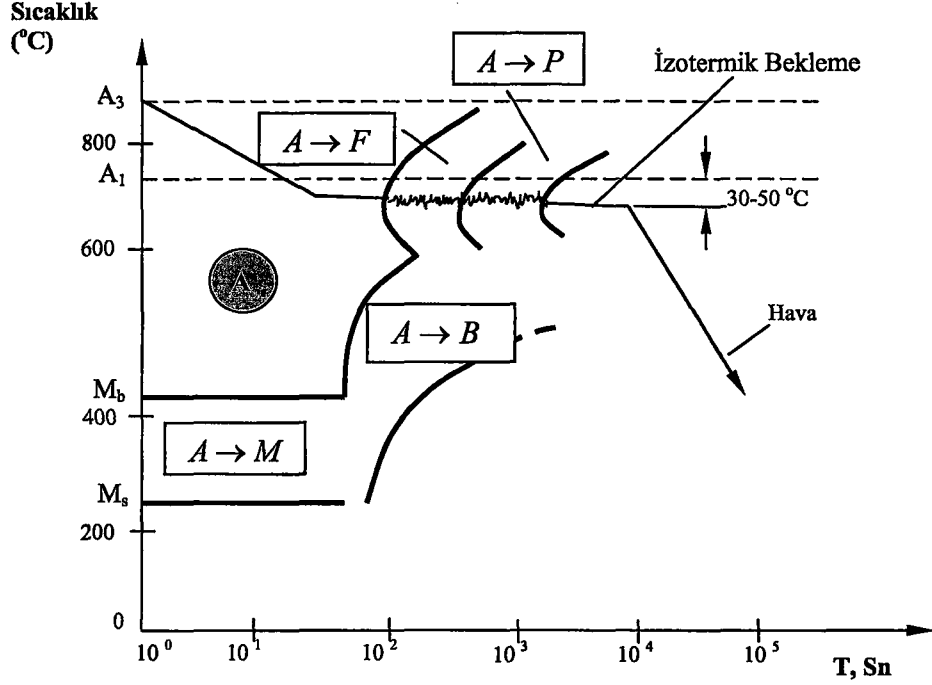


Şekil 4.10 Normalizasyon Tavlama Sıcaklığı ve Zamana Bağlı Olarak İç Yapının Dönüşmesi (Kayalı 2004).

Ötektik üstü çelikler (0,8...2%C) östenit haline dönüşemezler. Acı üzerine çıkıldığında sadece perlit kısmı aynı şekilde ince taneli östenit'e dönüşür. Sementit ağı önceleri parçalanmaz, ancak Ac_m sıcaklığı geçilince yavaş yavaş östenit içinde çözülmeye başlar. Yüksek tavlama sıcaklığı nedeni ile tane irileşmesinin meydana gelmesi önlenemez. Bu nedenle Perlit üstü çelikler için tavlama sıcaklığı Ac_i üzerindedir. Tane sınırındaki sementit küresel kristaller halinde toparlanır. Döküm parçaları çok yavaş soğuduğundan, Ferrit' in lamel şeklinde östenit' in içerisinde teşekkül ettiği iri taneli yapı oluşturur. Bu ferrit lamelleri östenit kristallerinin yönüne göre çok özel bir durum alırlar. Widmannstaetten (kaba tane) yapısı denilen bu yapı normalizasyon sonucu tamamen kaybolur ve malzeme daha iyi mekanik özelliklere kavuşur (Kayalı 2004).

4.3.5 İzotermal Tavlama

Tam tavlamaya oldukça benzerlik gösteren ve tam tavlama östenitleme işlemlerinin tümünün geçerli olduğu izotermal tavlamanın tam tavlama farkı ısı işleme tabi tutulan malzemenin östenitleme sıcaklığından A₁ sıcaklığının (50-100 °C) altındaki dönüşüm sıcaklığına mümkün olduğu kadar hızlı soğutulmasıdır. Dönüşüm işlemi tamamlandıktan sonra çelik oda sıcaklığına kadar serbestçe soğutulabilir. İzotermal tavlama uygulamak suretiyle işlemin süreci tam tavlama göre oldukça kısaltılabilir. Şekil 4.11' de izotermal tavlama işlemi için genel uygulama grafiği gösterilmiştir.



Şekil 4.11 Ötektoid Altı Çelikler İçin İzotermik Tavlama İşleminin TTT Diyagramı (Said 2003).

4.4 Yumuşatma Tavlaması

Yumuşatma tavlaması çeliklere uygulanan ısıl işlem tavlamasıdır. Bu tavlamanın sonucunda çelik içyapısında değişimler meydana gelecektir. Dövmeye tavlama ile bu işlemi birbirinden ayıran en temel özelliktir. Dövmeye tavlama malzemenin plastik şekil değişimini sağlayacak zemini hazırlarken, yumuşatma tavlama tamamen içyapıdaki değişiklikleri amaç edinmiştir. Yumuşatma tavlaması genellikle 723 °C civarında birkaç saat bekletme ile uygulanır. Sonra 600 °C'ye kadar yavaş soğuma yapıldıktan sonra oda sıcaklığına kadar serbestçe soğutulur.

Yumuşatma tavlamanın uygulamasının en temel amacı çeliğe düşük dayanım ve sertlik yani yüksek derecede uzama gösterebilecek hale getirmek amacıyla uygulanır.

Çeliklerden beklenen her zaman sertlik ve dayanım değildir. Sert malzemelerin birçok avantajının yanında işleme zorluğu gibi dezavantajı da vardır. Bu durum özellikle yüksek karbonlu çeliklerin kullanımında sorun edilebilir. Bu nedenle yapıdaki sementit ayrıştırılmalıdır. Çünkü yüksek dayanım ve düşük uzamaya neden olmaktadır. Elde edilecek yumuşama, bir çok işlem için en iyi başlangıç

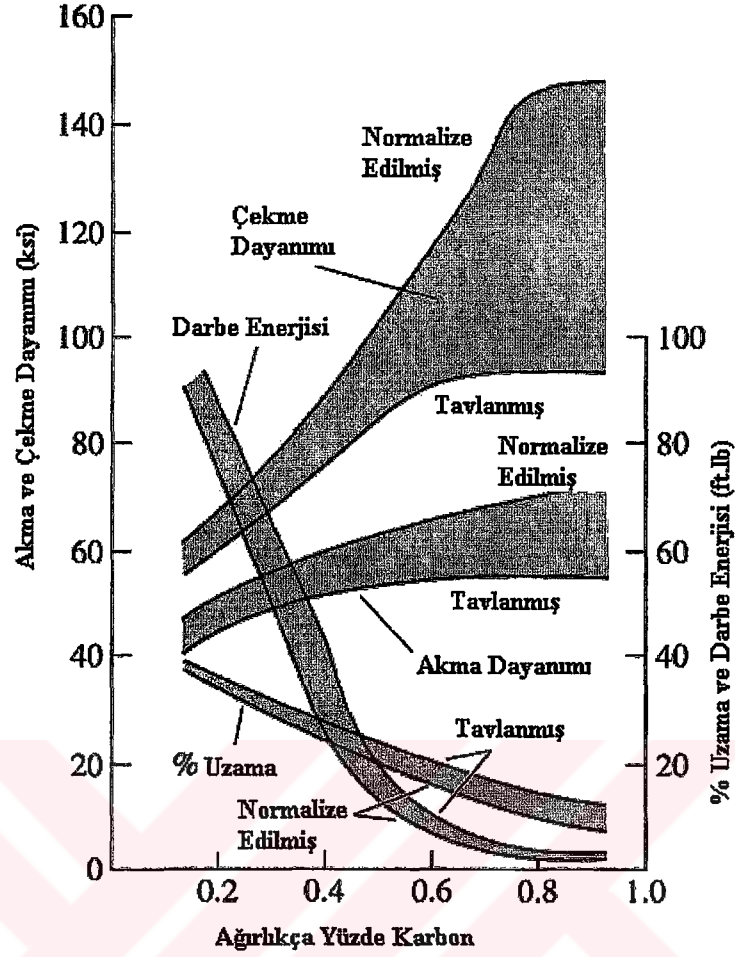
halidir. Özellikle yüksek karbonlu çelikler için talaş kaldırma böylece kolaylaştırılmış olur (Serfiçeli 2000).

4.5 Gerilim Giderme Tavlaması

Sıcak dövülmüş ve dökülmüş malzemelere talaş kaldırma işlemi uygulanmadan önce dar tolerans aralıklı parçalara yüzey temizlemeden önce ve kaynak yapılmış parçalar uygulanır. Düzensiz soğuma neticesinde meydana gelen iç gerilimlerin giderilmesi gerekir. Plastik şekil değişme sonunda iç gerilimler meydana gelebilir. İç gerilim içeren parçalar soğuk işlem gördükleri zaman talaş kaldırma esnasında gerilme altında bulunan lifler ayrılır veya gevşerse parça şekil değişimine uğrar (Weissbach 1998).

Gerilim giderme tavlaması ile malzeme içyapısı değişime uğramaz. Yüksek sıcaklıklarda çeliğin akma sınırı düşer. Bu durum Şekil 4.12' de gösterilmiştir. İç gerilimler miktarı fazla ise, malzeme kendini bırakır. Çekme gerilimi bulunan lifler uzar; basma gerilmesi altındaki lifler ise kısalmır. Bu esnada gerilimler giderek azalarak sonunda sadece artık bir gerilme kalır. Artık gerilmenin büyüklüğü çeliğin tavlama sıcaklığındaki akma sınırı kadardır (Weissbach 1998).

Sade karbonlu çeliklerin özellikleri üzerine karbon miktarının ve ısıl işlem çeşitlerinin etkisi Şekil 4.12' de gösterilmiştir.



Şekil 4.12 Sade Karbonlu Çeliklerin Özellikleri Üzerine Karbon Miktarı ve Isıl İşlem Çeşitlerinin Etkisi (ccm.udel.edu).

Şekil 4.12' de karbon miktarının artması ile çekme ve akma dayanımları artarken yüzde uzama ve darbe enerjisi değerleri giderek azalmaktadır. Ayrıca çekme ve akma gerilimleri için normalizasyon tavlama dayanımı arttırırken, yüzde uzama ve darbe enerjisi için bu durum tam tersi olarak etkili olmaktadır.

Çeliklerin çok yönlülüğünün ortaya çıkma sebebi, mikro yapılarının geniş oranda değişebilir olması ve aynı doğrultuda mekanik özelliklerinin de geniş ölçüde değişmesidir. Genel olarak çeliklerin yüksek dayanımlı ve düşük kırılma tokluğuna sahip olması karbonun mikro yapıda çok ince olarak dağılmasındandır. Bu genel kural martenzit (sadece karbon atomları) göz önünde bulundurulduğunda kesinlikle doğrudur. Çelik düşük bir sıcaklıkta temperleme işlemine tabi tutulduğunda yapıda küçük, sıkı bir şekilde dağılmış olan sementit

partikülleri ve küreselleştirilmiş çeliklerde ise geniş aralıklı dağılmış sementit partikülleri bulunur. Eğer mekanik özellikler açısından kaba perlit ve küreselleştirilmiş mikro yapıları kıyaslayacak olursak çok büyük bir farkın olmadığı görülür. Çünkü karbon dağılımı inceliği yaklaşık olarak aynıdır. Bu mikro yapılar için, fazların benzer faktörleri özellikler üzerine bazı etkiye sahiptir. Fakat bu etkiler karbon atomlarının dağılımının boyut ölçüleri ile karşılaştırılan ikinci dereceli etkilerdir (tu-darmstadt.de 2005).



5. KIRILMA MEKANIĞİ LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Kırılma, kararlı ve kararsız çatlak ilerlemelerinin koşullarını inceleyen geniş bir bilim dalıdır. Bu kadar geniş bir bilim dalı, temel ve ilgi alanı birbirinden çok farklı olan makine, inşaat ve metalurji mühendisliğinin uygulamaları içerisine etkin bir biçimde yayılmıştır. Kırılma, malzemelerin gerilim altında iki veya daha fazla parçaya ayrılması olarak tanımlanabilir.

Konstrüksiyon malzemelerinde (basınçlı kaplarda, gemi, köprü, trenler ve uçak v.b.) akma gerilimi altındaki daha düşük gerilmelerde kırılmalar meydana gelmektedir. Bu kırılmaların nedenlerinin araştırılması mukavemet problemlerinin önemli bir konusu olarak ortaya çıkmıştır ve kırılma mekaniği açısından değerlendirilir. Yapı çeliği gibi sünek malzemelerde dış kuvvet etkisi ile yapısında var olan küçük çatlak uçlarının plastik deformasyona maruz kalması ile bu kısımlarda gerilim yığılması meydana gelir. Sünek-gevrek geçiş sıcaklığının altındaki yüklemelerde, yüksek gerilim hızlarında veya bileşik gerilmelerin etkisi ile malzemeler sünek kırılma yerine, düşük gerilme değerlerinde gevrek olarak kırılmışlardır.

Klasik mühendislik mukavemet hesaplamalarında malzeme içinde bulunan hatalar (gerilim konsantrasyonları) göz ardı edildiğinden gerçek gerilim ile arasında farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Bu farklılıktan dolayı konstrüksiyon malzemeleri akma mukavemetinin oldukça altındaki gerilimlerde kopmaktadır. Bu durum göstermektedir ki konstrüksiyon imalatında malzeme içerisinde önceden var olan veya imalat esnasında oluşabilecek hasar ve çatlakların bu malzemedeki yapılmış olan parça veya konstrüksiyonun kırılmasına etkisi göz önünde tutulmalıdır. Kırılma mekaniği, hesaplamaların temelinde esas olarak gevrek kırılma üzerinde yoğunlaşmıştır.

Kırılma mekaniğinin kriteri şu şekilde yazılır.

$$K_I \leq K_{Ic} \quad (5.1)$$

Burada:

K_I - Gerilim şiddet faktörü

K_{Ic} - Kırılma tokluğu

Formül (5.1)'in sol tarafı konstrüksiyonu, sağ tarafı ise bu konstrüksiyonda kullanılan malzemeyi ifade etmektedir. K_{Ic} 'nin elde edilmesi için ASTM E-399 standardı geliştirilmiştir.

Malzemenin kırılma veya mukavemetini kaybetme; malzemenin tahrip olarak, parçalara ayrılması ve bu suretle maruz kalacağı yükleri emniyetle kaldırma kabiliyetini tamamen kaybetmesi demektir. Kırılmanın sebebi ve mekanizması henüz tam anlamıyla anlaşılmış değildir. Kırılmada önemli rol oynayan iki türlü mukavemet mevcuttur. Bunlardan ilki; kayma mukavemetidir ki kristalleri teşkil eden atomlardan bir kısmının diğer kısma göre kaymasını önler. Diğer kohezyon mukavemeti olup atomların birbirinden uzaklaşmasına engel olmaya çalışır. Bu iki mukavemetten hangisi daha küçük ise cismin o mukavemetin sona ermesi ile malzeme kırılır.

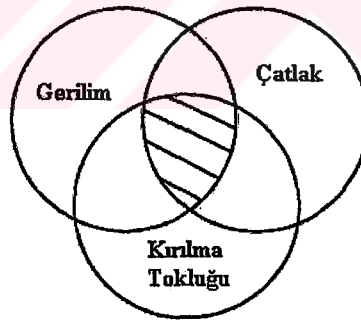
5.1 Kırılma Çeşitleri

Plastik şekil değişiminin neden olduğu hatalar, kristal kafes düzlemlerini bozmaya ve dislokasyonlara engel olmaya çalışırlar. Bu durumda malzemenin plastik şekil değişimine karşı dayanımı artar. Bu hatalar yukarıda da sıralandığı gibi yer alan ve ara yer atomlar, tane sınırları, çökeltiler ve dislokasyon ağlarıdır. Daha büyük hatalara neden olanlar ise inklüzyonlar, porozite, yüzey hataları ve küçük çatlaklardır. Gerilim konsantrasyonları içerisinde en tehlikeli olanı ise çatlaklardır (Horoz 1993).

Kırılmanın türü ne olursa olsun kırılma iki aşamada oluşur. İlk aşama “çatlak oluşumu”, bunu izleyen ikinci aşama ise “çatlağın ilerlemesi”dir. Oluşan çatlağın ilerlemeye başlayabilmesi için gerekli koşullar yüklemenin şekli ve değerine bağlı olmakla beraber, çatlağın gözlenebilme düzeyine, kristal hatalara, dislokasyonlara, yapıda var olan mikro çatlaklara ve yüzey kusurlarına bağlıdır.

Kırılma, malzeme içyapısındaki çatlağın kararlı veya kararsız şekilde yayılmasını içeren bir hata mekanizmasıdır. Ferritik çeliklerde, bütün kırılma davranışları sıcaklığa bağlıdır. Düşük sıcaklıklarda, gevrek kırılma baskındır ve bir kez çatlak genişlemeye başladığında çatlak yayılması hızla ve aşırı derecede gerçekleşecektir. Yüksek sıcaklıkta ve östenitik paslanmaz çelik gibi malzemeler için kırılma davranışı sünektir ve çatlağın büyümesi kararlı yırtılma mekanizmasının yerini alacaktır (twi.co.uk 2005).

Kırılma veya çatlak büyümesinin ortaya çıkması için, çatlağın boyutu ve malzemenin kırılma tokluğu gereklidir. Bu ise gerilim uygulamasının zararlı bir kombinasyonudur (twi.co.uk 2005). Bu durumun grafiksel ifadesi Şekil 5.1’ de gösterilmiştir.



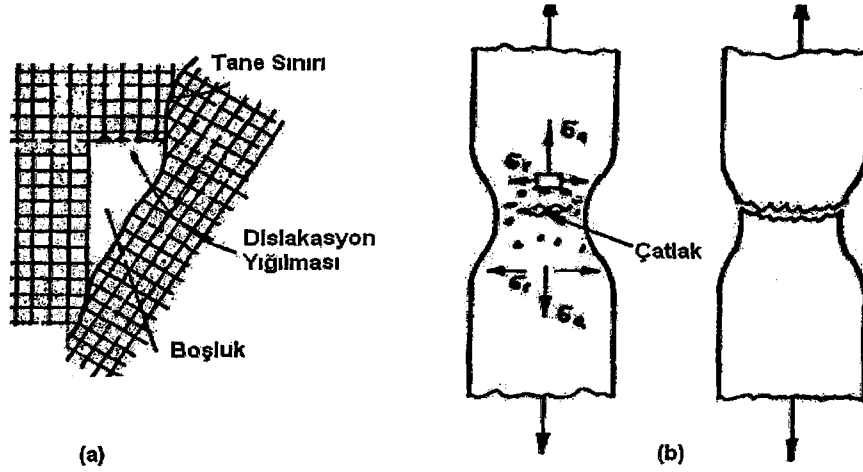
Şekil 5.1 Kırılma Faktörleri (twi.co.uk 2005).

Yukarıda sözü edilen durumun matematiksel formülü ise şu şekildedir.

$$K_I \geq K_{mat} \quad (5.2)$$

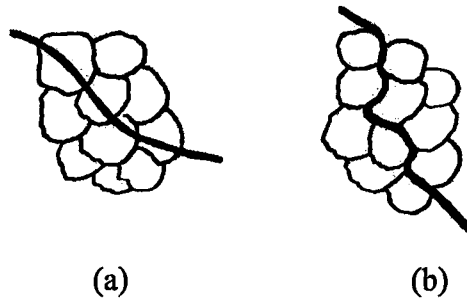
Kırılma işlemi, malzeme içerisinde genellikle yorulma etkisi ile bir çatlağın meydana gelmesidir. Dış kuvvetler etkisi ile çatlaklar birleşerek mikro çatlağa, mikro çatlaklarında birleşmesi ile makro çatlağa dönüşür. Sonunda makro

çatlakların birleşmesi ile malzemenin kopma veya kırılma ile hasara uğraması gerçekleşir. Bu durumun şematik gösterimi Şekil 5.2' de gösterilmiştir.



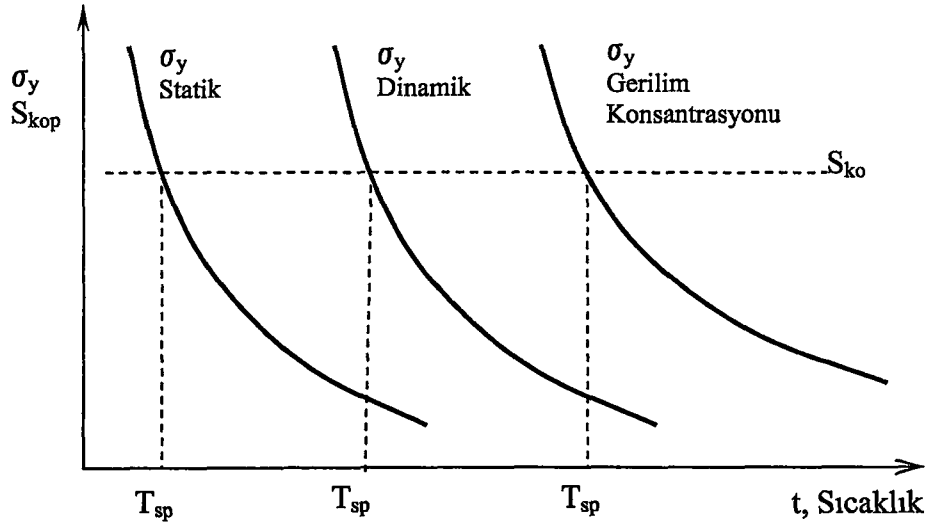
Şekil 5.2 Sünnek Kırılma (a) Dislokasyon Yığılması Sonucu Boşluk Oluşumu, (b) Çekme Etkisinde Büzülme, Çatlak Oluşumu ve Kırılma.

Kırılma içyapı açısından taneler arası (interkristalit) veya taneler boyunca (transkristalit) olarak gerçekleşir. Eğer çatlak metal tanelerinin gövdesinden geçerek ilerlerse buna transkristalit kırılma denir ve genellikle kırılma yüzeyi lifli, fıncan görünümündedir. Çatlak tane sınırları arasından ilerleyerek geçerse bu duruma interkristalit kırılma adı verilir. Kırılma yüzeyi parlak ve düzlemseldir. Daima gevrek kırılma interkristalit şeklinde olur. Bu durumun genel görünüşü Şekil 5.3' de gösterilmiştir.



Şekil 5.3 (a) Taneler Üzeri (Transkristalit) Kırılma, (b) Tane Sınırları Arası (İnterkristalit) Kırılma.

Pratikte en önmeli sorunlardan birisi de kırılmaya gerilim konsantrasyonlarını, etki eden dış kuvvet tarzının (statik veya dinamik kuvvetler) ve sıcaklığın etkisi büyük önem taşımaktadır. Bu durum şematik olarak Şekil 5.4' de gösterilmiştir.



Şekil 5.4 Malzemelerin Çeşitli Yükleme Durumları ve Gerilim Konsantrasyonu'nun Sünek-Gevrek Geçiş Sıcaklığına Etkisi (IOFFE Şeması).

Şekil 5.4' de σ_y - akma gerilimi, S_{kop} - kopma gerilimini ve T_{sp} - sıfır plastikliğe sahip sünek-gevrek geçiş sıcaklığını ifade etmektedir.

Bir makine elemanının üzerine gelen zorlama şekli, yani gerilme ve şekil değişimi ile ortam koşulları, oluşacak kırılmanın türünü belirler. Çeşitli dış etkilere karşın, ancak pek az malzemede bir tek kırılma türü görülebilir. Aynı malzemede birden fazla kırılma türünü görmek mümkündür. Özellikle endüstriyel uygulamalarda kırılma türü, kırılma mekaniği yönünden, kırılma sırasında iç yapıda olan değişikliklerden, çatlakların yapıda ilerleyiş şeklinden ve kırılan kesit görünümünden ayrı ayrı değerlendirilebilir. Malzemenin kırılma öncesi durumu ve kırılmaya neden olan yükleme koşullarına göre kırılma türleri gevrek ve sünek kırılma olarak iki şekilde incelenebilir.

5.1.1 Gevrek Kırılma

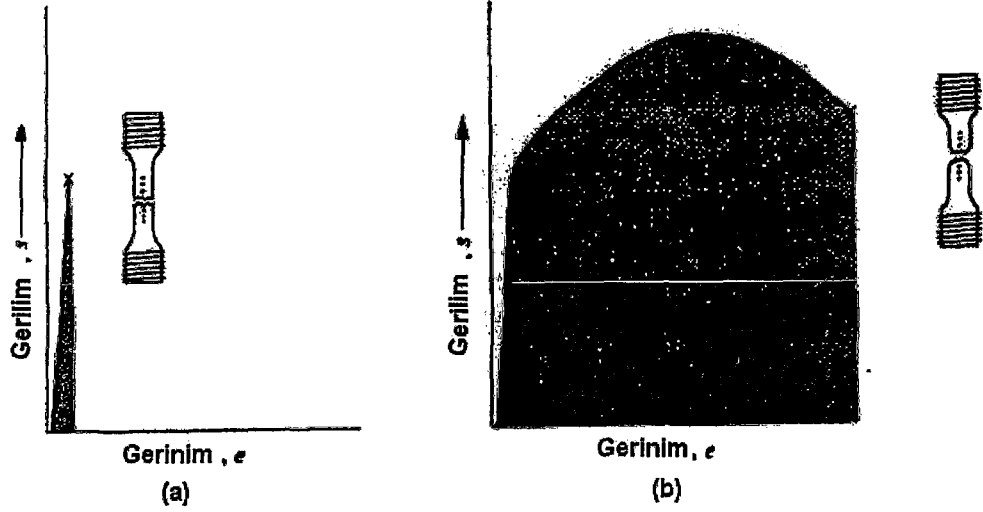
Gevrek kırılma, yükleme işlemi esnasında yok sayılabilecek kadar az, ya da hiç plastik deformasyon etkisi göstermeden aniden meydana gelen kırılma türüdür. Sünek kırılmaya nispeten daha az enerji absorbe eden bir kırılma türüdür. Çatlak ilerlemesi çok hızlı olup, bu ilerleme çevre yüzey enerjisi ile oluşmaktadır. Diğer bir deyimle, çatlak oluşuktan sonra, ilerlemesi için sürekli dış gerilime ihtiyaç

yoktur. Birçok durumda gevrek olarak kırılan malzemelerde, sadece kırılmış yüzey civarında çok az oranda kalıcı şekil değişikliği olduğundan, kırılan yüzeyin görünümü parlak ve düzgündür. Bu tür kırılmanın nerede ve ne zaman oluşacağı önceden bilinmediği için çok tehlikeli olabilmektedir. Bu tür kırılmalar geçmişte önemli kazalara, büyük can ve mal kayıplarına yol açtığı için üzerinde yoğun araştırmalar yapılmış ve halen de yapılmaktadır. Genellikle camlar, seramikler, bazı metaller gibi gevrek yapıya sahip malzemelerde bu duruma oldukça sık rastlanmaktadır.

5.1.2 Sünek Kırılma

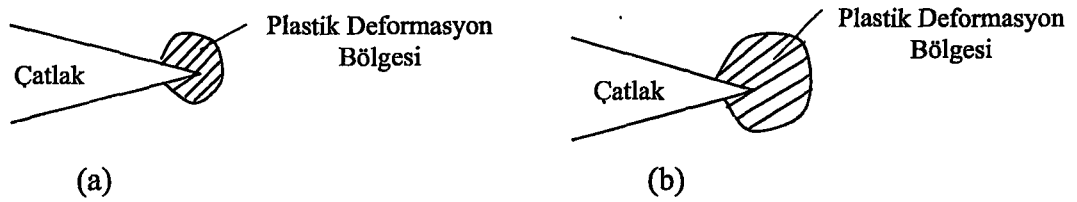
Eğer deformasyon işleminde kırılmadan önce malzemede plastik deformasyon meydana gelirse bu tip kırılmalara sünek kırılma adı verilir. Sünek kırılma belirgin ölçüde plastik şekil değiştirme ve büzülmeden sonra oluşur ve büyük oranda enerji sönümler. Kalıcı şekil değişikliklerinin miktarı, kırılma sonrasında malzemedeki kesit azalması veya gerilme yönünde oluşan boy uzaması ölçülerek saptanabilir. Kırılma kalıcı şekil değişikliği oluşturabilecek gerilme ile doğru orantılı olup, yavaş oluşmaktadır. Kırılma sonucu kırılma yüzeylerinin görünümü liflidir. Sünek kırılmada, gevrek kırılmaya göre hasarın nerede oluşacağı önceden görülebildiği için gerekli önlemler alınarak zararın büyümesi önlenir.

Gevrek malzemeler elastik sınırın sonunda kırılır ve elastik sınırla çekme mukavemeti değerleri birbirine çok yakındır. Bütün gevrek malzemelerin mukavemet hesaplarında kritik gerilme olarak çekme mukavemeti değeri dikkate alınır. Sünek kırılmada ise kritik gerilme olarak akma sınırı seçilir. Şekil 5.5' de gevrek ve sünek kırılma için tek eksenli gerilim-gerinim diyagramında kırılma enerjileri gösterilmiştir.



Şekil 5.5 (a) Gevrek Kırılma, Hiç veya Çok Az Plastik Deformasyon (b) Sünek Kırılma da, Plastik Deformasyon İçin Enerji Gereksinimi. Tokluk, s - e Eğrisi Altındaki Alanda Eşittir (Lawrence ve Vlack 1994).

Bunun yanı sıra gevrek ve sünek kırılmalar gerilim konsantrasyonu ucundaki plastik deformasyonu bölgelerinden fark edilir. Gevrek kırılmalarda çatlak ucundaki plastik deformasyon bölgesi sünek kırılmaldaki plastik deformasyon bölgesinden küçüktür. Sünek kırılmalarda plastik deformasyon bölgesinin büyük olması çatlak ucunun körleşmesine neden olmaktadır bu durumun genel görünüşü Şekil 5.6' da gösterilmiştir.

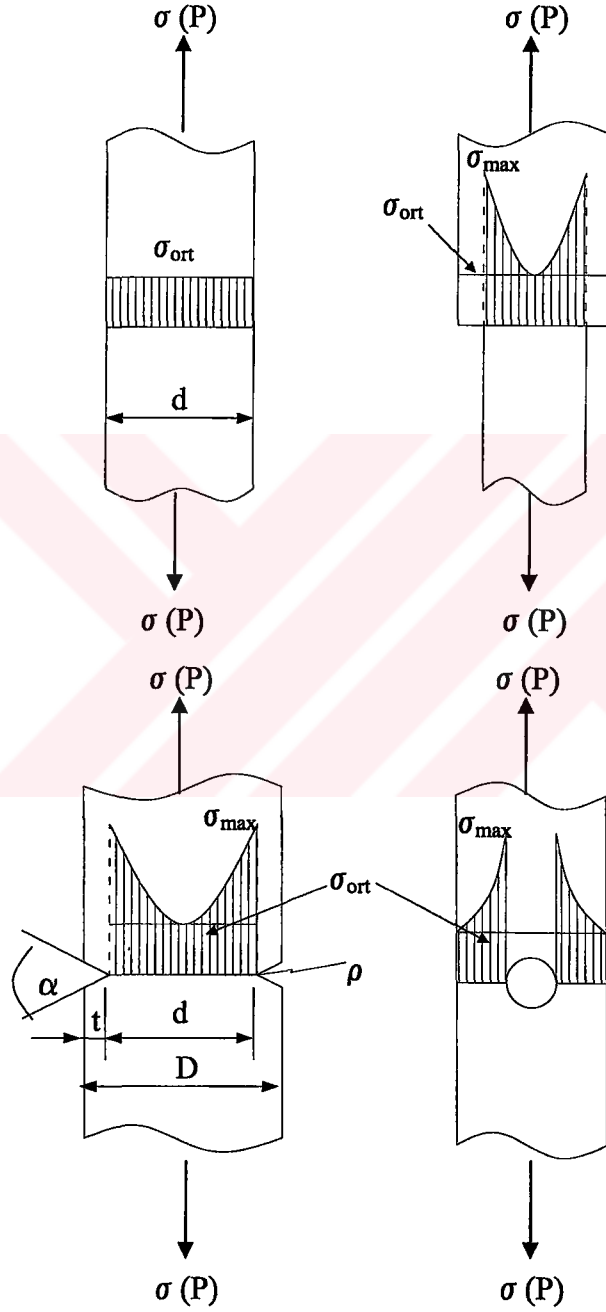


Şekil 5.6 (a) Gevrek Kırılma için Çatlak Ucundaki Plastik Deformasyon Bölgesi (b) Sünek Kırılma için Çatlak Ucundaki Plastik Deformasyon Bölgesi.

Sünek kırılmanın gerçekleşmesi için harcanan enerji gevrek kırılmaya harcanan enerji değerinden daha yüksektir.

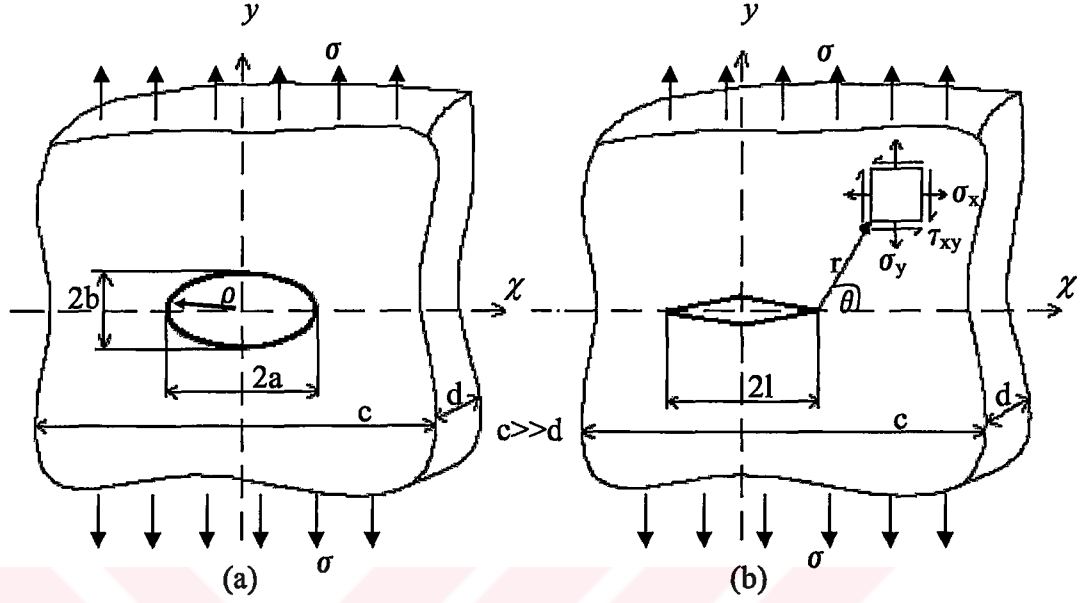
5.2 Gerilim Konsantrasyonları

Günümüzde kullanılan konstrüksiyon malzemeleri karmaşık geometrilere sahiptir. Bu geometrilere bağlı olarak, malzemelerde bulunabilecek gerilim konsantrasyonu çeşitleri Şekil 5.7' de gösterilmiştir.



Şekil 5.7 Makine Elemanlarında Bulunan Bazı Gerilim Konsantrasyonu Şekilleri.

Şekil 5.8' de, gerilim konsantrasyonlarının matematiksel olarak ifade edebilmek için şemalar gösterilmektedir (Makhutov 1973).



Şekil 5.8 Elips (a) ve Romb (b) Şeklindeki Gerilim Konsantrasyonları.

Şekil 5.8 a ve b' deki düzlemsel gerilim şemasında, elips ve romb şeklindeki gerilim konsantrasyonları, σ gerilim ile yüklenmiştir.

Şekil 5.8, a' da ki elips şeklindeki gerilim konsantrasyonunun (x eksenindeki) uç kısımlarında meydana gelen $\sigma_y = \sigma_{\max}$ gerilimi, İnglis' e göre şu şekilde ifade edilir.

$$\sigma_y = \sigma_{\max} = \sigma_{\text{ort}} \left(1 + 2 \frac{a}{b} \right) \quad (5.3)$$

elipsin yarı çapı $\rho = \frac{b^2}{a}$

$$\sigma_y = \sigma_{\max} = \sigma_{\text{ort}} \left(1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}} \right) \quad (5.4)$$

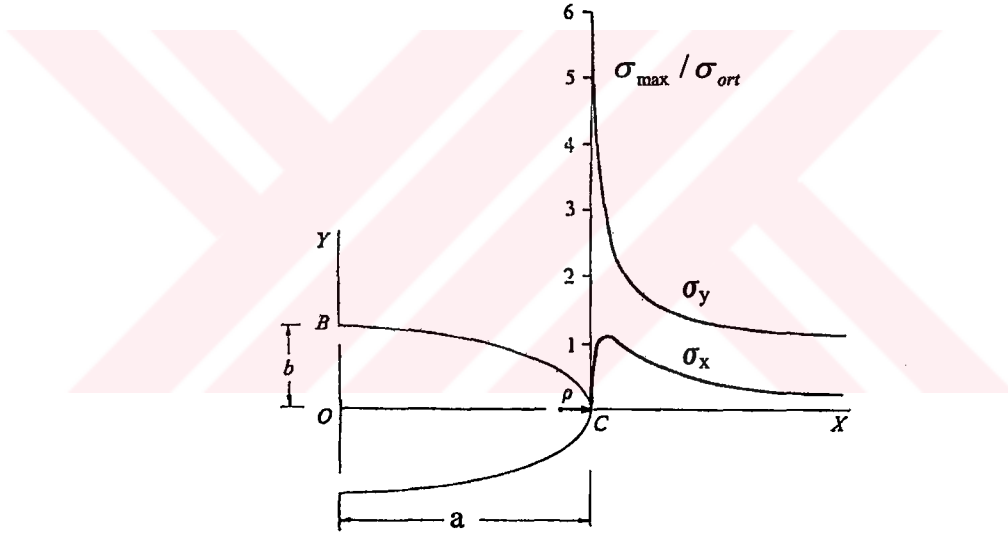
Formül (5.4)' de, σ_{\max} gerilim değeri, elipsin büyük eksenindeki yarı çapı ρ ile bağlıdır. Eğer ρ sifira yaklaşırsa ($\rho \rightarrow 0$) formül (5.4)' de, $\sigma_{\max} \rightarrow \infty$ olmaktadır. Yani gerilim konsantrasyonu elipsten çatlağa dönüşürse, teorik olarak çatlak

ucundaki gerilim değeri sonsuza ulaşır. Bu nedenle kırılma açısından çatlak, en tehlikeli gerilim konsantrasyonu sayılır. Gerilim konsantrasyonunun teorik katsayısı $\alpha_\sigma > 1$ olur, yani

$$\alpha_\sigma = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{ort}} = \left(1 + 2\sqrt{\frac{a}{\rho}} \right) \quad (5.5)$$

Makine parçalarında bulunan delikler gerilim konsantrasyonu olarak alınırsa ($a = \rho$) formül (5.5)'e göre $\alpha_\sigma = 3$, yani $\sigma_{\max} = 3 \sigma_{ort}$ olur.

Şekil 5.9' da eliptik bir delikteki ($a = 3b$) gerilim konsantrasyon bölgesindeki gerilimler ve bu gerilimlerin, gerilim konsantrasyonu bölgesindeki değişimleri şematik olarak gösterilmektedir (Lawn ve Wilshaw 1975).



Şekil 5.9 Eliptik Delikteki ($a= 3b$) Gerilim Konsantrasyonu Bölgesindeki Gerilimler

Çatlak ucunda dış kuvvet etkisinden meydana gelen gerilim dağılımını elde etmek için, sistemin enerji dengesi açısından elde edilmiş Griffith çözümü ve elastikiyet teorisi esasında elde edilmiş olan Vestergard, Muskhelişvili çözümleri hemen hemen aynıdır. Ancak, Griffith çözümü elastik enerjideki denge durumu diğer çözümler ise matematiksel usuller ile elde edilmiştir (Makhutov 1973).

Vestergard çözümüne göre, Şekil 5.8, b' deki şemaya göre y eksenini boyunca gerilim aşağıdaki formülle ifade edilir.

$$\sigma_y = \sigma \frac{x}{\sqrt{x^2 - l^2}} = \frac{x/l}{\sqrt{(x/l)^2 - 1}} \quad (5.6)$$

Burada;

l - çatlak uzunluğunun yarısı

x - çatlağın ucundan itibaren, ilerleme yönünde (x ekseninde) alınan herhangi bir nokta (Şekil 5.8, b)

$\frac{x}{l}$ - çatlağın nispi uzunluğu

σ - etki eden dış gerilim

$\frac{x}{l} = 1$ olursa $\sigma_y = \infty$ olur.

$$(\sigma_y)_{\lim_{x \rightarrow l}} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \text{ alınır} \quad (5.7)$$

$$K = \sigma_y \sqrt{2\pi r} \quad (5.8)$$

Burada;

r - çatlak ucundan incelenen noktaya kadar olan mesafe (Şekil 5.8, b)

Irwin tarafından Şekil 5.8, b' deki şemadaki gerilim şiddet katsayısı için şöyle bir formül elde edilmiştir.

$$K = \sigma \sqrt{\pi l} \quad (5.9)$$

Formül (5.9), formül (5.8)' de yerine konulursa,

$$\sigma_y = \sigma \sqrt{\frac{l}{2r}} \quad (5.10)$$

Formül (5.10), çatlak bulunan bir parçanın temel parametrelerini kapsamaktadır. Dış gerilim (σ) sabit olduğu için, çatlak ucunda meydana gelen gerilim (σ_y), çatlak uzunluğu (l) ve radius vektörü (r) ile bağlıdır.

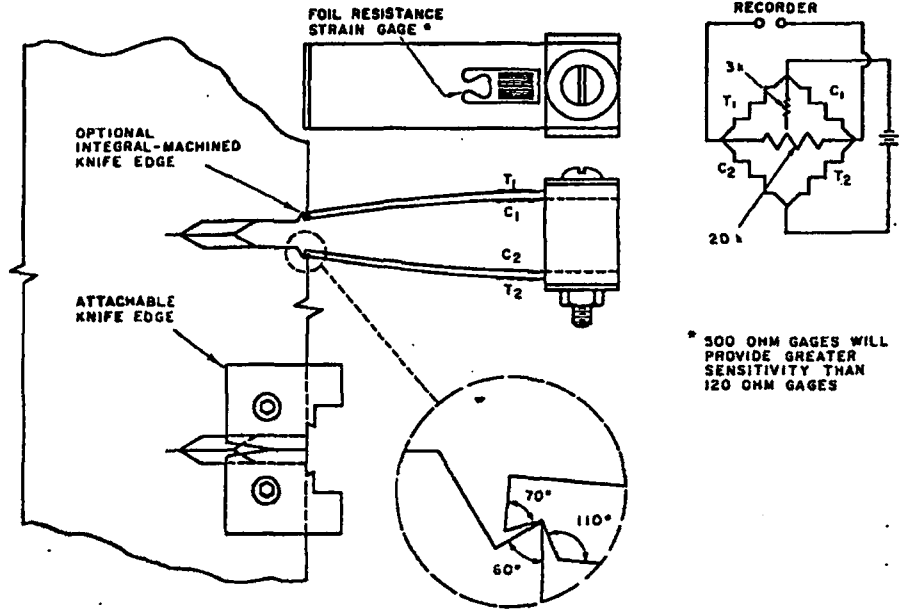
Şekil 5.8, b'deki şemada, θ açısını da kapsayan, x - y koordinat alanında herhangi bir bölge için, dış gerilim etkisinden meydana gelen σ_x , σ_y , τ_{xy} gerilimlerinin değeri, aşağıdaki formüllerle ifade edilir.

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \left(\cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right) \\ \sigma_y &= \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \left(\cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right) \\ \tau_{xy} &= \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \left(\cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right)\end{aligned}\tag{5.11}$$

5.3 ASTM E-399 Standardı

Kırılma tokluğu K_{Ic} ' yi tayin etmek için ASTM E-399 standardı geliştirilmiştir. ASTM standardına göre, düşük akma gerilimine sahip çeliklerin kırılma tokluğunun tayin edilmesi için, düzlemsel deformasyon durumuna (gevrek kırılma) uygun büyük numunelerin deneye tabi tutulması gereklidir (ASTM, 2003).

Şekil 5.10' da kuvvet - çatlak açılma (P - V) grafiklerinin çatlak açılma koordinatının çizilmesi için kullanılan dinamometrenin şematik görünüşü verilmektedir (ASTM, 2003).



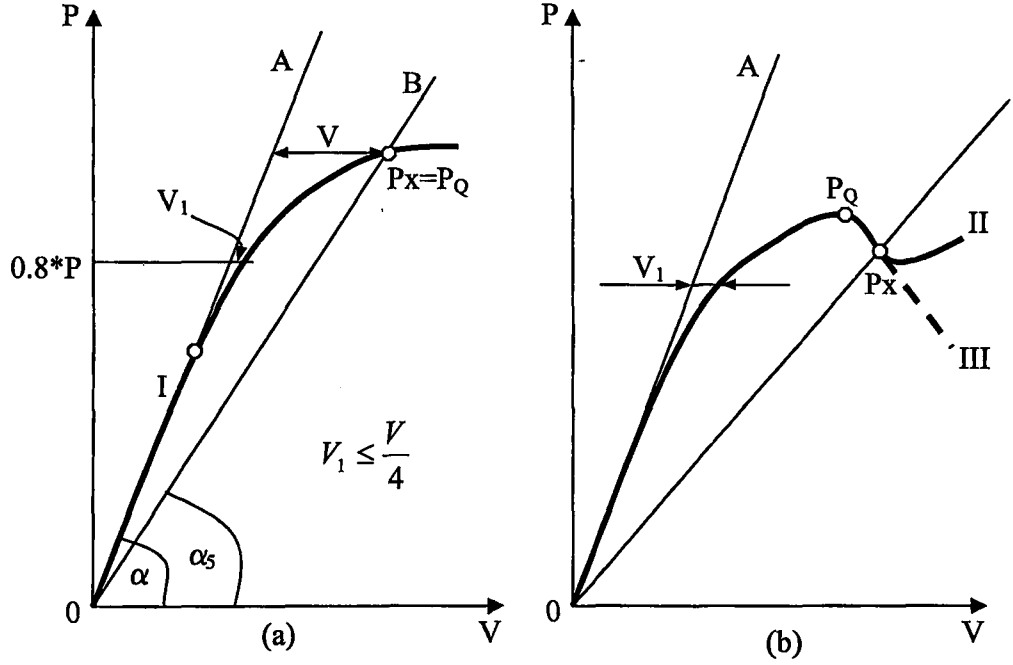
Şekil 5.10 Dinamometrenin Montaj Metodu ve Klips Ölçüleri.

Deney esnasında kuvvet-çatlak açılma (P - V) grafikleri çizilir. Bu çizilen grafikler standarda göre özel yöntemlerle analiz edilir. Malzeme özellikleriyle bağımlı olan 1., 2. ve 3. tip eğri Şekil 5.11' de verilmiştir.

Standarda göre, Şekil 5.11' deki grafiklerle K_{Ic} 'yi değerlendirmek için kullanılan P_Q kuvveti tayin edilmelidir (ASTM, 2003).

Şekil 5.11' de ki grafikte elastik bölge çizgisi devam ettirilir ve bu çizginin açısı α 'dan %5 daha az bir açıda OB çizgisi çizilir.

$$\text{Burada } V_1 \leq \frac{V}{4} \text{ olmalıdır.} \quad (5.12)$$



Şekil 5.11 Üç Tip Kuvvet-Çatlak Açılma (P - V) Grafiği.

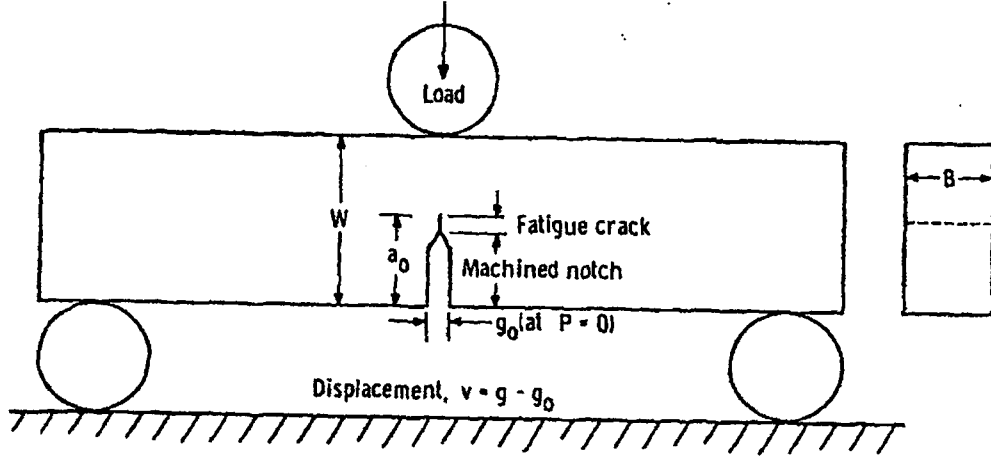
İfade sağlanırsa, düzlemsel deformasyon gerçekleşmiş ve numune kalınlığı yeterli sayılır. Bu şart yerine getirildiğinde P_Q kuvveti Şekil 5.11' deki gibi kabul edilir. Şekil 5.11, b' de ise 2. ve 3. tip eğride P_Q kuvveti gösterilmiştir. Elde edilmiş olan P_Q kuvvetine göre aşağıdaki durum yerine getirilirse, kırılma tokluğu $K_Q = K_{Ic}$ olarak kabul edilir.

$$B, l \geq 2,5 \left(\frac{K_Q}{\sigma_{ag}} \right)^2 \quad (5.13)$$

Formül de; σ_{ag} - Akma gerilimini ifade etmektedir.

ASTM E-399 standardı uyarınca deneylere tabi tutulan numunelerde oluşturulan çatlaklar, gerilim konsantrasyonu ile başlar ve titreşim makinelerinde elde edilir. Çatlak, gerilim konsantrasyonunun ucundan itibaren ilerlemeye başlar ve istenen çatlak uzunluğu elde edilir. Deneyden sonra kırılmış numune üzerinden gerçek çatlak uzunluğu ölçülür.

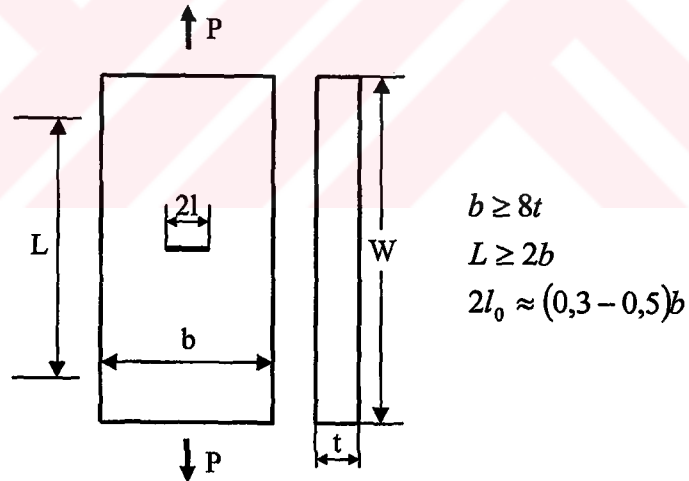
Şekil 5.12' de çatlak oluşturulmuş numunenin şematik görünüşü verilmiştir (Liebowitz 1969).



Şekil 5.12 K_{Ic} ' nin Saptanması İçin Gerekli Eğme Numunesi.

Bu standarda göre, aşağıdaki şekillerdeki 4 tip çentikli numune, K_Q parametresini değerlendirmek için deneye tabi tutulmaktadır (ASTM, 2003).

Şekil 5.13' de, numunenin orta kısmında bir gerilim konsantrasyonu ve daha sonra çatlak oluşturulmaktadır. Bundan sonra numune aksenal çekmeye tabi tutulmaktadır.



Şekil 5.13 ASTM E399 Standardına Göre I. Tip Numune Şekli.

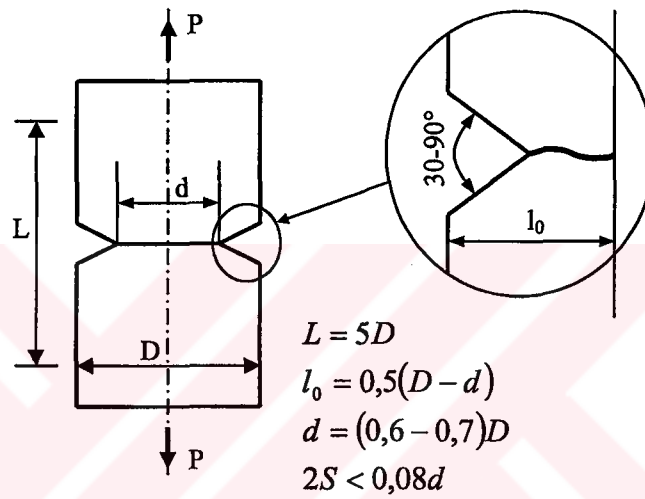
Burada; b- Numune genişliğini, W- Numune uzunluğu, l- Gerilim konsantrasyonu ve L- Numunenin deney esnasındaki dikkate alınan uzunluğunu ifade etmektedir.

I. tip numune için,

$$K_Q = \frac{P_Q}{t\sqrt{b}} Y_1 \quad (5.14)$$

$$Y_1 = 0,380 \left[1 + 2,308 \left(\frac{2l_0}{b} \right) + 2,439 \left(\frac{2l_0}{b} \right)^2 \right] \quad (5.15)$$

Şekil 5.14' deki numune silindiriktir.



Şekil 5.14 ASTM E399 Standardına Göre II. Tip Numunenin Şematik Gösterimi.

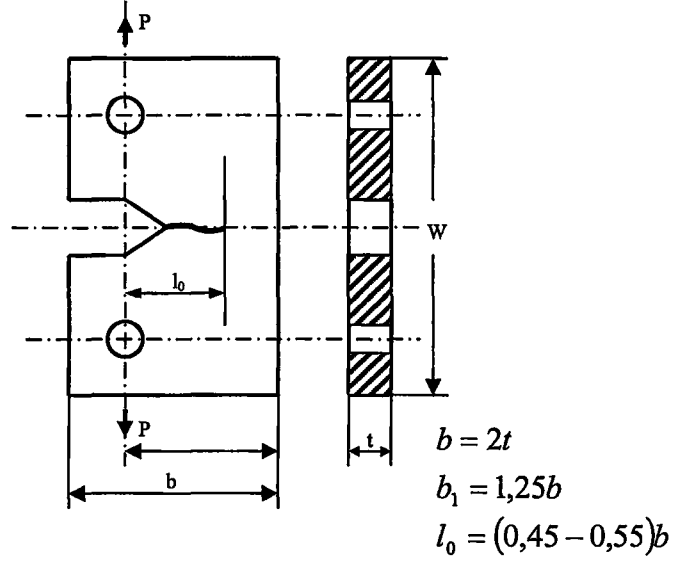
II. tip numune için,

$$K_Q = \frac{P_Q}{\sqrt{D^3}} (Y_2' + Y_2'') \quad (5.16)$$

$$Y_2' = 6,53 \left[1 - 1,8167 \left(\frac{d}{D} \right) + 0,9167 \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right] \quad (5.17)$$

$$Y_2'' = 3,1 \left(\frac{2S}{d} \right) \quad (5.18)$$

Şekil 5.15' deki numune eksantrik (eksenel kaçık) çekmeye tabi tutulmaktadır.



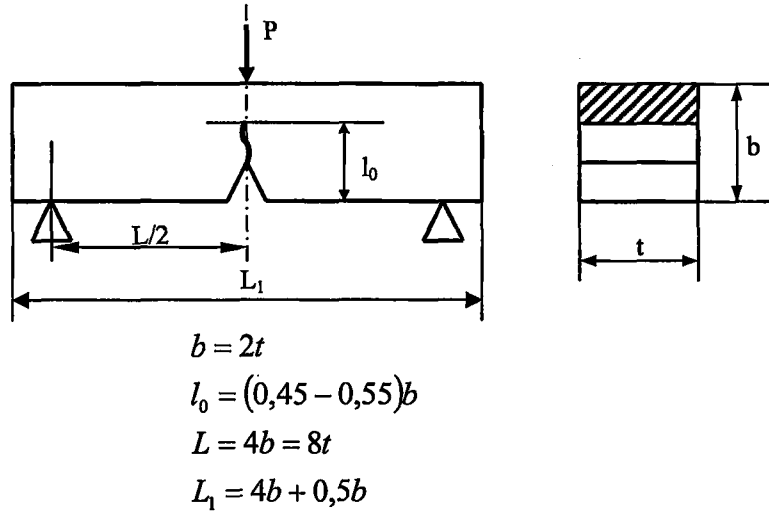
Şekil 5.15 ASTM E399 Standardına Göre III. Tip Numune Şeklinin Şematik Gösterimi.

III. tip numune için,

$$K_Q = \frac{P_Q}{t\sqrt{b}} Y_3 \quad (5.19)$$

$$Y_3 = 13,74 \left[1 - 3,38 \left(\frac{l_0}{b} \right) + 5,572 \left(\frac{l_0}{b} \right)^2 \right] \quad (5.20)$$

Şekil 5.16' da ise, numune üç nokta basma deneyine tabi tutulmaktadır.



Şekil 5.16 ASTM E399 Standardına Göre IV. Tip Numune Şekli .

IV. tip numune için,

$$K_Q = \frac{P_Q L}{t\sqrt{b^3}} Y_4 \quad (5.21)$$

$$Y_4 = 3,494 \left[1 - 3,396 \left(\frac{l_0}{b} \right) + 5,839 \left(\frac{l_0}{b} \right)^2 \right] \quad (5.22)$$

Burada;

Y - numunenin sınırlı boyutunu göz önünde tutan parametre

t - numune kalınlığı

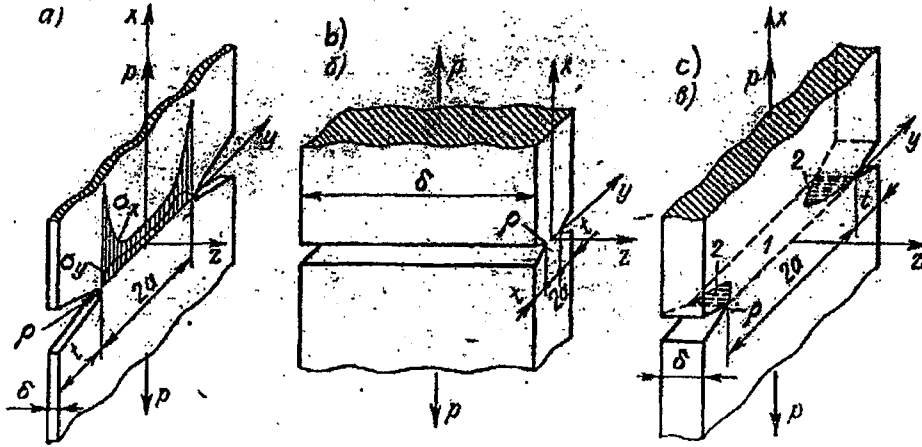
b - numune genişliği

l_0 - çatlak uzunluğu

Y, parametresi çatlakın nispi uzunluğuna bağlı olarak polinom, grafik veya tablo şeklinde ifade edilebilmektedir. Formül (5.15, 5.17, 5.20 ve 5.22)'de Y polinom olarak verilmiştir.

5.4 Düzlemsel Gerilim ve Düzlemsel Deformasyon Durumları

Şekil 5.17' de düzlemsel gerilim ve düzlemsel deformasyon durumlarını açıklamak için şemalar verilmiştir (Kopelman 1978).



Şekil 5.17 Düzlemsel Gerilim ve Düzlemsel Deformasyon Durumları.

Şekil 5.17, a' da levhanın kalınlığı δ , çentik ucunun yarıçapı ρ 'dan küçüktür. Bu durumda, malzeme üç ekseninde deforme olmaya müsaittir. Şekil 5.17, b' de levhanın kalınlığı δ , çentik ucunun yarıçapından çok büyüktür. Bu durumda, malzeme (z) ekseninde deforme olmaz ve σ_z gerilimi meydana gelir.

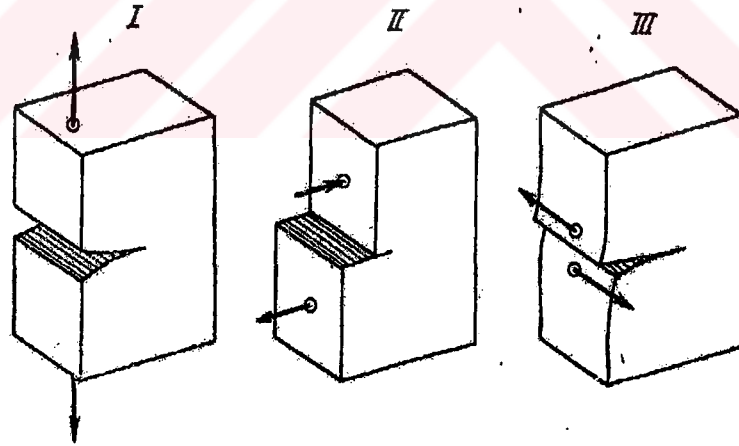
Şekil 5.17, a' da düzlemsel gerilim, Şekil 5.17, b' de düzlemsel deformasyon durumları, Şekil 5.17, c'de ise düzlemsel gerilim ve düzlemsel deformasyon arası durum gösterilmektedir. Şekil 5.17, c'de 1. bölge düzlemsel deformasyonu, 2. bölgeler ise düzlemsel gerilimi ifade etmektedir.

Kırılma mekaniğinde üç çeşit kırılma şeması söz konusudur. Bu şemalar Şekil 5.18' de gösterilmiştir (Makhutov 1973).

Mod I- Açılma modu (K_I)

Mod II- Kayma Modu (K_{II})

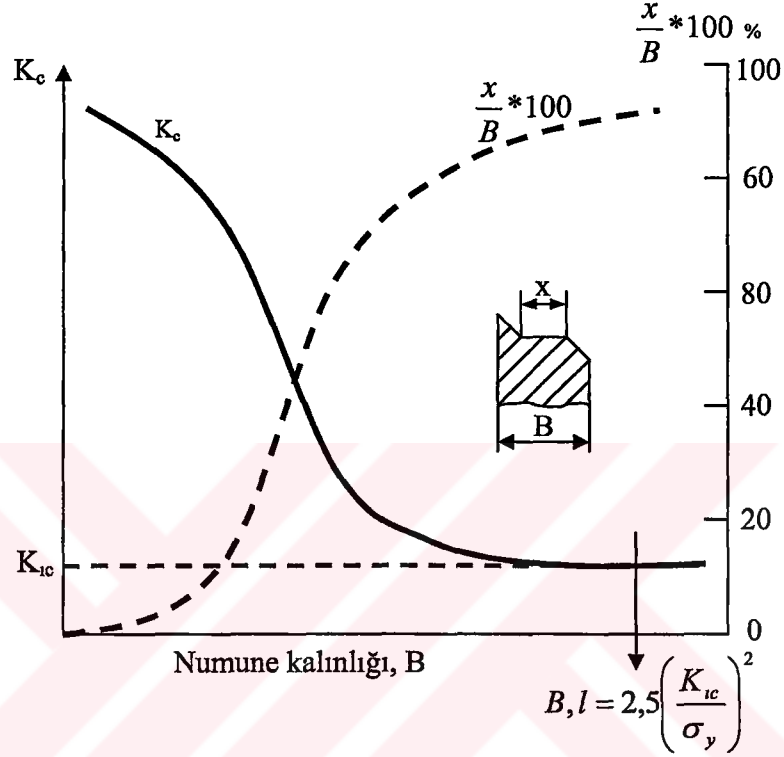
Mod III- Yırtılma Modu (K_{III})



Şekil 5.18 Kırılma Tipleri.

Çatlak ilerlemesi ve çatlak ucunda meydana gelen kritik gerilim durumu, kritik gerilim şiddet katsayısı K_c ile ifade edilir. K_c numunenin veya parçanın kalınlığı ile bağlıdır. Şekil 5.19' da K_c ' nin, numune kalınlığı ile bağlılığı gösterilmiştir (Broek 1974).

Şekil 5.19' dan görüldüğü üzere numune kalınlığı arttıkça K_c değeri azalmakta ve numune kalınlığı belirli bir kalınlığa eriştiğinde $K_c = K_{Ic}$ olmaktadır. Bundan sonra kalınlık artsa da bu değer değişmez. Buna göre K_{Ic} malzemenin sabiti sayılır. Aynı zamanda kırılma tavrı, plastikten (K_{cmax} 'dan), gevrek kırılmaya kadar değişmektedir (Broek 1974).



Şekil 5.19 Kritik Gerilim Şiddet Katsayısının, Numune Kalınlığı İle Değişim Grafiği (Broek 1974).

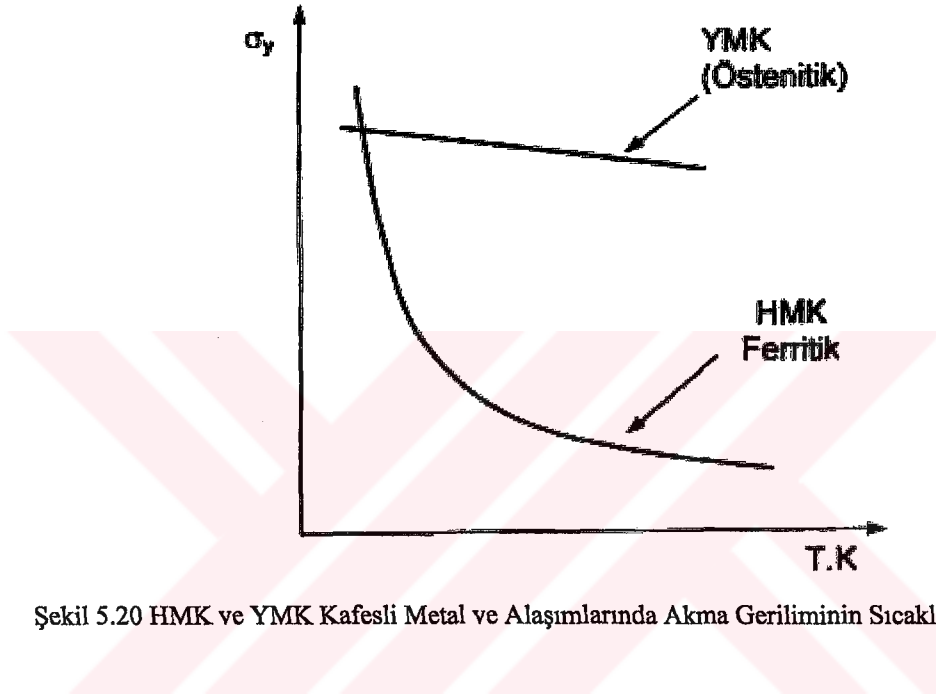
Düzlemsel deformasyon durumundaki kesit kalınlığında tam gevrek kırılma gerçekleşmekte ve kırılma tokluğu K_{Ic} ile ifade edilmektedir. Düzlemsel deformasyon durumunun (gevrek kırılma) gerçekleşmesi için ($K_c = K_{Ic}$ olması için) numune kalınlığı aşağıdaki formülle ifade edilir (Broek 1974).

$$B, l \geq 2,5 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_{ag}} \right)^2 \quad (5.23)$$

K_{Ic} ' yi değerlendirmek için Formül (5.23)'ye göre numune kalınlığının gerekli boyutlarda olması zorunludur.

5.5 HMK Kafesli Metallerde Akma Gerilimine Sıcaklığın Etkisi

Hacim merkezli küp kafese sahip metal ve alaşımlarında akma gerilimi sıcaklığa oldukça bağımlıdır. Sıcaklığın azalması ile akma gerilimi artar. Yüzey merkezli küp kafesli metal ve alaşımlarında ise akma geriliminin sıcaklıkla bağımlılığı yok denecek kadar az veya hiç yoktur. Şekil 5.20' de HMK ve YMK kafesli metal ve alaşımları için, akma geriliminin sıcaklıkla değişimi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.20 HMK ve YMK Kafesli Metal ve Alaşımlarında Akma Geriliminin Sıcaklıkla Değişimi.

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1 Tez Çalışmasında Kullanılan Çelikler

Tez çalışmasında kullanılan çeliklerin Afyon 8. Bakım Merkezi Komutanlığı Kalite Güvence Müdürlüğü Fizik-Kimya Laboratuvarında kimyasal analizleri yapılmıştır. Tablo 6.1’de AISI 1030 çeliğinin spektro analiz sonucu verilmiştir.

Tablo 6.1 AISI 1030 Çeliğinin Spektro Analiz Sonuçları.

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Malzeme 1030	97,68	0,421	0,219	0,726	0,033	0,023	0,090	0,044
	Ni	Al	B	Co	Cu	Nb	Ti	W
	0,087	0,006	0,0023	0,035	0,272	0,012	0,006	0,002

AISI 1030 çelikleri genellikle makine parçaları, dingiller, gemi şaftları, cıvata v.s. yapımında kullanılmaktadır.

Tablo 6.2’ de ise AISI 8620 çeliğinin spektro analiz sonuçları verilmiştir.

Tablo 6.2 AISI 8620 Çeliğinin Spektro Analiz Sonuçları.

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Malzeme 8620	97,24	0,175	0,219	0,650	0,035	0,017	0,461	0,141
	Ni	Al	B	Co	Cu	Nb	Ti	W
	0,374	0,030	0,0019	0,056	0,193	0,017	0,007	0,021

Semantasyon çeliği sınıfına giren AISI 8620 çeliğinin kullanım alanlarına oto dişlileri, traktör dişlileri, miller, ekstrüzyon işlemi ile şekillendirilen piston pimleri, zincir baklaları ve dişlileri, otomobil vites kutusu, zorlamalı parçalar, direksiyon mekanizmaları, diferansiyel yüzük dişlileri, uçak motorları, kam mili v.s. örnek olarak gösterilebilir.

Tablo 6.3' de ise AISI 1016 çeliğine ait spektro analiz sonuçları verilmiştir.

Tablo 6.3 AISI 1016 Çeliğinin Spektro Analiz Sonuçları.

Malzeme 1016	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cu
	98,81- 99,26	0,13-0,18	0,1 max	0,6-0,9	0,04 max	0,05 max	0,25 max

6.2. Çeliklere Uygulanan Isıl İşlemler

AISI 1030, AISI 8620 ve AISI 1016 çeliklerine ısıl işlem uygulamadan önce bu çeliklerden çekme deneyi için numune hazırlanmıştır. Hazırlanmış olan numuneler için Fe-Fe₃C diyagramında östenit bölgesi olarak ifade edilen A₃ sıcaklık eğrisi üzerinde belirlenen üç farklı östenitleme sıcaklığında tam tavlama işlemi uygulanmıştır. AISI 1030 çeliği için belirlenen ısıl işlem sıcaklık rejimleri Tablo 6.4' de verilmiştir.

Tablo 6.4 AISI 1030 Çeliği İçin Isıl İşlem Rejimleri.

Malzeme	Tavlama Sıcaklığı (°C)	Bekletme Süresi (Saat)	Soğutma Ortamı	Isıl İşlem Çeşidi
AISI 1030	-	-	-	Satıldığı Durum
AISI 1030 / 1.1	900	1	Fırında Soğutma	Tam Tavlama
AISI 1030 / 1.2	900	1	Fırında Soğutma	Tam Tavlama
AISI 1030 / 1.3	900	1	Fırında Soğutma	Tam Tavlama
AISI 1030 / 2.1	1100	1,5	Fırında Soğutma	Tam Tavlama
AISI 1030 / 2.2	1100	1,5	Fırında Soğutma	Tam Tavlama
AISI 1030 / 2.3	1100	1,5	Fırında Soğutma	Tam Tavlama
AISI 1030 / 3.1	1300	2,5	Fırında Soğutma	Tam Tavlama
AISI 1030 / 3.2	1300	2,5	Fırında Soğutma	Tam Tavlama
AISI 1030 / 3.3	1300	2,5	Fırında Soğutma	Tam Tavlama

AISI 8620 çeliği için belirlenen ısıtma işlem sıcaklık rejimleri Tablo 6.5' de verilmiştir.

Tablo 6.5 AISI 8620 Çeliği İçin Isıl İşlem Rejimleri.

Malzeme	Tavlama Sıcaklığı (°C)	Bekletme Süresi (Saat)	Soğutma Ortamı	Isıl İşlem Çeşidi
AISI 8620	-	-	-	Satıldığı Durum
AISI 8620 / 1.1	950	1	Fırında Soğutma	Tam Tavlama
AISI 8620 / 1.2	950	1	Fırında Soğutma	Tam Tavlama
AISI 8620 / 1.3	950	1	Fırında Soğutma	Tam Tavlama
AISI 8620 / 2.1	1150	1,5	Fırında Soğutma	Tam Tavlama
AISI 8620 / 2.2	1150	1,5	Fırında Soğutma	Tam Tavlama
AISI 8620 / 2.3	1150	1,5	Fırında Soğutma	Tam Tavlama
AISI 8620 / 3.1	1300	2,5	Fırında Soğutma	Tam Tavlama
AISI 8620 / 3.2	1300	2,5	Fırında Soğutma	Tam Tavlama
AISI 8620 / 3.3	1300	2,5	Fırında Soğutma	Tam Tavlama

AISI 1016 çeliği için belirlenen ısıtma işlem sıcaklık rejimleri Tablo 6.6' da verilmiştir.

Tablo 6.6 AISI 1016 Çeliği İçin Isıl İşlem Rejimleri.

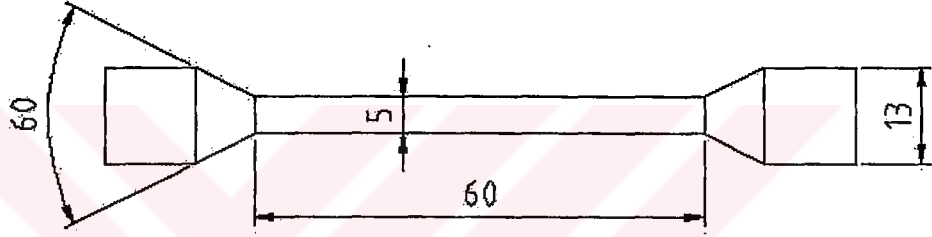
Malzeme	Tavlama Sıcaklığı (°C)	Bekletme Süresi (Saat)	Soğutma Ortamı	Isıl İşlem Çeşidi
AISI 1016	-	-	-	Satıldığı Durum
AISI 1016 / 1.1	950	1	Fırında Soğutma	Tam Tavlama
AISI 1016 / 1.2	950	1	Fırında Soğutma	Tam Tavlama
AISI 1016 / 1.3	950	1	Fırında Soğutma	Tam Tavlama
AISI 1016 / 2.1	1150	1,5	Fırında Soğutma	Tam Tavlama
AISI 1016 / 2.2	1150	1,5	Fırında Soğutma	Tam Tavlama
AISI 1016 / 2.3	1150	1,5	Fırında Soğutma	Tam Tavlama
AISI 1016 / 3.1	1300	2,5	Fırında Soğutma	Tam Tavlama
AISI 1016 / 3.2	1300	2,5	Fırında Soğutma	Tam Tavlama
AISI 1016 / 3.3	1300	2,5	Fırında Soğutma	Tam Tavlama

Tavlama sıcaklığı, bekletme süresi ve soğutma ortamı belirlenmiş olan AISI 1030, AISI 8620 ve AISI 1016 çelik numuneleri daha sonra A.K.Ü. Teknik

Eğitim Fakóltesi, Metalografi Laboratuvarında bulunan PROTHERM marka t¼p fırında argon koruyucu gaz atmosferi altında ısıl işlemleri gerçekleştirilmiştir. T¼p fırın tercih edilmesi; t¼p fırının iç hacminin küçük olması nedeni ile daha iyi bir atmosfer koruması sağlamasıdır.

6.3 Çekme Deneyi

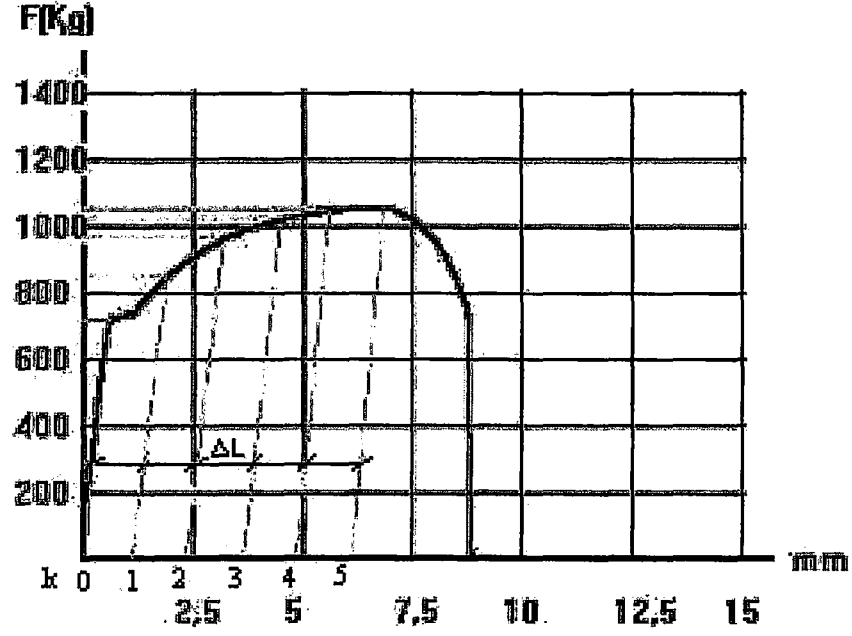
Isıl işlemleri yapılmış olan çekme deneyi numuneleri Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknik Eğitim Fakóltesi Metal Eğitimi Bölümü Metalografi Laboratuvarında bulunan çekme cihazında deneysel işlemlere tabi tutulmuştur. Çekme deneyi için hazırlanan tek eksenli çekme deneyi numunesi Şekil 6.1’de gösterilmiştir.



Şekil 6.1 Silindirik Çekme Deneyi Numunesi.

Çekme deneyleri sonucunda elde edilmiş olan kuvvet uzama grafiğinden gerilim değerlerini ve pekleşme katsayısını elde edebilmek için grafik Şekil 6.2’deki gibi en az beş eşit aralığa bölünür ve aşağıdaki formüllere göre σ_i ve ϵ_i değerleri bulunur.

Tez çalışmasında kullanılan çeliklerin HMK kafes yapısına sahip olması nedeni ile bu çeliklerin, akma gerilimleri sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 6.2 Çekme Deneyinde Elde Edilen Kuvvet-Deformasyon (P-Δl) Grafiği.

$$\sigma_i = \frac{P_i}{A_0} \left(1 + \frac{K\Delta}{l_0} \right) \quad (6.1)$$

$$\epsilon_i = \ln \left(1 + \frac{K\Delta}{l_0} \right) \quad (6.2)$$

Bu formüller de; P_i - Bölünmüş olan kesitlerin kuvvet değeri

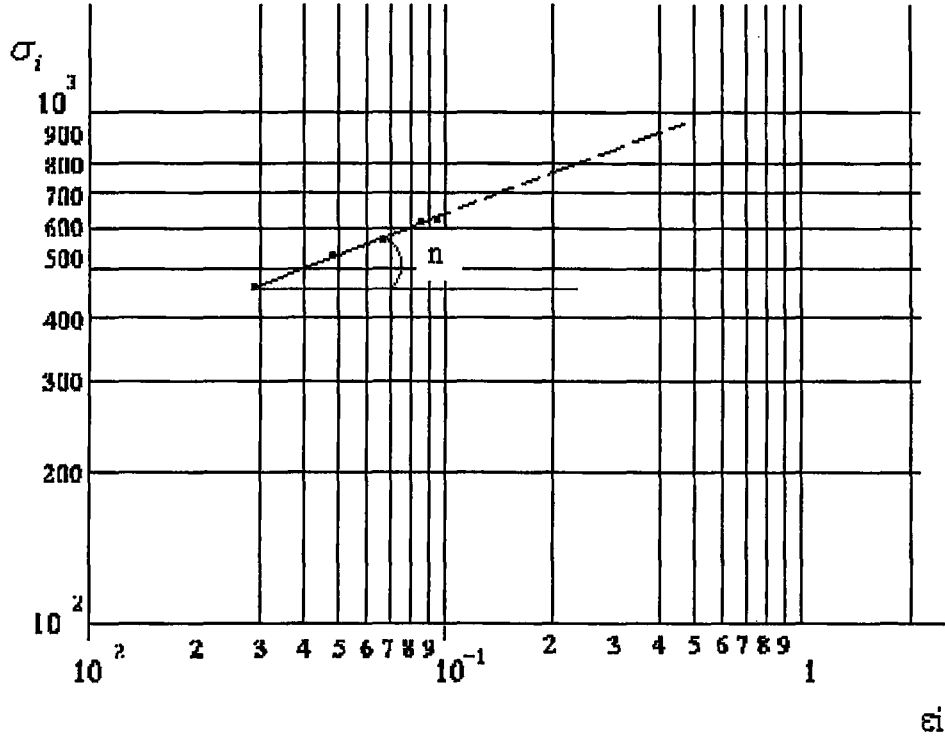
A_0 - Çekme deneyi numunesinin ilk kesit yüzeyi

K - Bölümlene sayısı

Δ - Bölümlenmiş kesitler arasındaki mesafe

l_0 - Çekme deneyi numunesinin ilk uzunluğu

Bulunan σ_i ve ϵ_i değerlerine göre Şekil 6.3'de gösterildiği gibi logaritmik kağıt üzerinde noktaların yerleştirilmesi ile doğrusal bir çizgi çizilir.



Şekil 6.3 Pekleşme Katsayısının Belirlenmesi İçin Çizilen $\ln\sigma_i - \ln\epsilon_i$ Logaritmik Değişimi Grafiği.

Logaritmik eksenler üzerinde belirlenen σ_i ve ϵ_i değerleri vasıtası ile pekleşme katsayısı (n) hesaplanır.

$$n = \frac{\ln \frac{\sigma_5}{\sigma_1}}{\ln \frac{\epsilon_5}{\epsilon_1}} \quad (6.3)$$

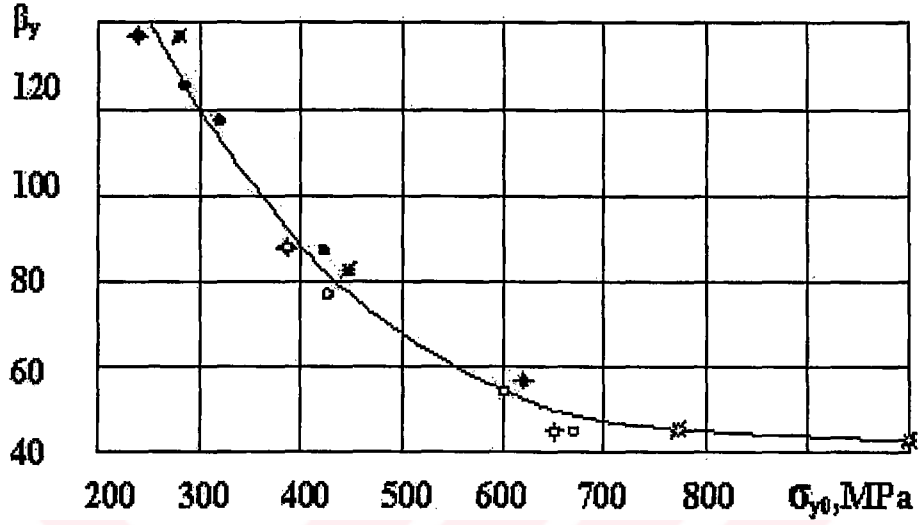
AISI 1030, AISI 8620 ve AISI 1016 çeliklerinin akma geriliminin farklı sıcaklıklardaki değerlerini aşağıdaki formüle göre hesaplamak mümkündür (Makhutov 1973).

$$\sigma_{y(T)} = \sigma_{y_0} \exp\left[\beta_y \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \quad (6.4)$$

Burada; σ_{y_0} = akma geriliminin $T_0=293$ K' deki değeridir.

$\beta_y = \sigma_{y_0}$ 'a bağlı olarak değişen bir parametredir.

Makhutov formülüne (Formül 6.4) göre akma geriliminin değişik sıcaklıklardaki değerini tayin ederken kullanılan β_y parametresi Şekil 6.4'deki grafikten tayin edilebilmektedir.



Şekil 6.4 Akma Geriliminin β_y İle İlişkisi (Makhutov 1973).

$T=T_0$ sıcaklığındaki silindirik numunenin tek eksenli çekme deneyi sonucunda elde edilmiş olan "gerilim-gerinim" diyagramından $\sigma_{y0} = \sigma_{\max 0} = S_{kop}$ şartlarında, silindirik numuneler için sünek-gevrek geçiş sıcaklık sınırı T_* aşağıdaki formül ile ifade edilir.

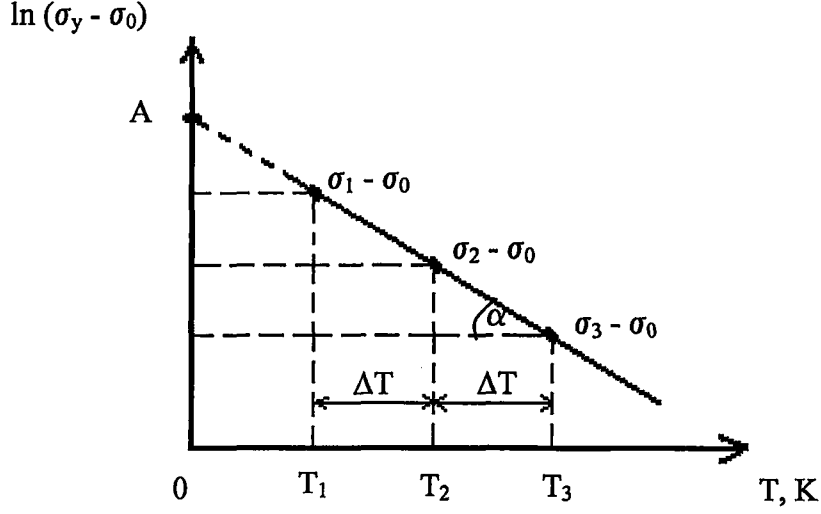
$$T_* = \left[\frac{1}{T_0} + \frac{\ln\left(\frac{S_{kop}}{\sigma_{y0}}\right)}{\beta_y} \right]^{-1} \quad (6.5)$$

Akma geriliminin $T = T_*$ sıcaklıktaki değeri

Değişik sıcaklıklardaki akma geriliminin (σ_1 , σ_2 ve σ_3) değerleri aşağıdaki Makhutov formülüne göre belirlenir.

$$\sigma_1 = \sigma_{y0} \exp\left[\beta_y \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \quad (6.6)$$

σ_1 (250 K), σ_2 (200 K), σ_3 (150 K)' ün tayin edilmesinden sonra; A, α ve Yaroşeviç formülünde Akma gerilimi parametrelerinin belirlenebilmesi için σ_0 değeri bulunmalıdır.



Şekil 6.5 Akma Geriliminin Atermik (σ_0) Kısmını Değerlendirme Üzerine Bir Şema

Şekil 6.5' e göre aşağıdaki formül ile σ_0 değeri tayin edilebilmektedir.

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_2^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_3}{2 \cdot \sigma_2 - (\sigma_1 + \sigma_3)} \quad (6.7)$$

Yaroşeviç formülüne göre akma geriliminin ve A değerinin tayin edilmesinde kullanılan α parametresi aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\alpha = \frac{\ln \left(\frac{\sigma_{y(1)} - \sigma_0}{\sigma_{y(2)} - \sigma_0} \right)}{\Delta T} \quad (6.8)$$

Burada; $\sigma_{y(1)} = 250$ °K deki akma gerilim değeri
 $\sigma_{y(2)} = 200$ °K deki akma gerilim değeri

A' nın tayin edilebilmesi için;

$$A = (\sigma_1 - \sigma_0) e^{\alpha T_1} = (\sigma_2 - \sigma_0) e^{\alpha T_2} = (\sigma_3 - \sigma_0) e^{\alpha T_3} \quad (6.9)$$

Elde edilen bu değerlere göre daha sonra her bir sıcaklık için σ_y değeri tayin edilir (Yaroseviç 1970).

$$\sigma_y = \sigma_0 + A \exp^{(-\alpha.T)} \quad (6.10)$$

Kırılma tokluğunun hesaplanması;

Az karbonlu düşük alaşımlı çeliklerin akma gerilimi sıcaklığa bağlı olduğundan, bu tür çeliklerin kırılma tokluğunu tayin etmek için çatlak ucunda gerçekleşen plastik deformasyonun termo aktivasyon enerji kavramı kullanılmıştır. Kırılma mikro mekanizması, çatlak ucunda belirli bir ρ mesafede meydana gelen kritik gerilim (σ_c) etkisinde mikro çatlağın meydana gelir ve meydana gelen mikro çatlak ana çatlağa doğru hareket ederek ana çatlak ile birleşir. Aynı işlemin defalarca tekrar edilmesi sonucu malzemenin kırılması mikro mekanizması kabul edilmiştir.

Böylelikle kabul edilmiş olan termo aktivasyon enerji ve kırılma mikro mekanizmalarını ele alarak kırılma tokluğu (K_{Ic}) Aşağıdaki formüle göre tayin edilecektir (Saidov 1989).

$$K_{Ic} = K_{Ic}^o \exp(\alpha.m.T) \quad (6.11)$$

Burada; $K_{Ic}^o = K_{Ic}$ nin T=0 K deki değeri

α = Malzemenin sıcaklığa hassasiyetini gösteren bir parametredir.

m = kırılma tokluğunun sıcaklığa hassasiyetini gösteren bir parametredir.

$$K_{Ic}^o = A\sqrt{\pi d} \quad (6.12)$$

Burada; d = Deneye tabi tutulan malzemenin ortalama tane boyutudur.

Son olarak kırılma tokluğu K_{Ic} aşağıdaki formüle göre hesaplanır.

$$K_{Ic} = K_{Ic}^o \left(\frac{A}{\sigma_y} \right)^{\frac{\kappa}{T^*}} \quad (6.13)$$

Sünek-gevrek geçiş sıcaklık sınırının (T_*) tane boyutundan bağımlılığını, HMK kafesli metal ve alaşımlar için yarı logaritmik $T_* - \ln d^{-1/2}$ koordinatlarında, γ açısı altında Şekil 6.6' da çizilmiş doğru çizgi oluşturur. Bu doğru çizginin matematiksel formülünü elde etmek için, şematik olarak çizilmiş olan Şekil 6.7' den açı katsayısı γ tayin edilmelidir. Burada ;

$$\frac{T_{*1} - T_{*2}}{\ln \sqrt{d_1 / d_2}} = \gamma \quad (d_2 < d_1) \quad (6.14)$$

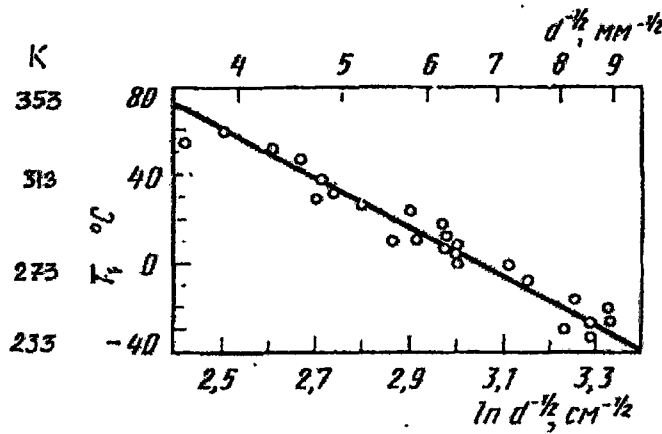
Tane çapı d_1 ve d_2 olan çelikten yapılmış olan silindirik numuneler deneye tabi tutularak elde edilmiş olan σ_{y01} ve σ_{y02} değerlere göre Formül (6.5)' den T_{*1} ve T_{*2} saptanır ve Formül (6.14)' den γ tayin edilir. T_* ve d arasındaki ilişki aşağıdaki formüle göre ifade edilir.

$$T = T_* - \gamma \ln \sqrt{d_* / d} \quad (d < d_*) \quad (6.15)$$

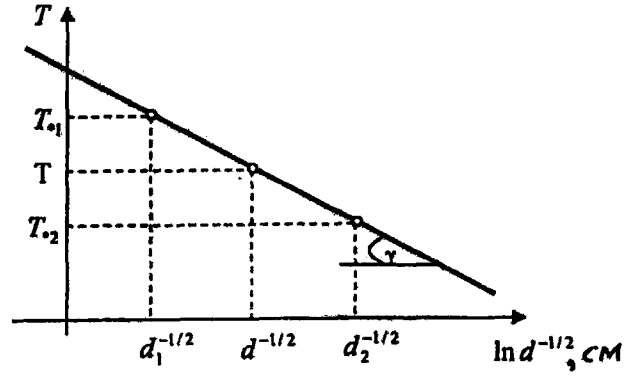
Bu formülde; d = Herhangi bir tane boyutu değeri;

T = Formül (6.5)'e göre d tane boyutuna uygun olan sıcaklık değeri.

Formül (6.15)' e göre eğer $d=d_*$ olursa $T= T_*$; $d < d_*$ olursa $T < T_*$ ve $d > d_*$ olursa $T > T_*$ olur. Yani tane boyutu bir d_* değerinden daha büyük olursa, sünek-gevrek geçiş sıcaklık sınırı T artar.



Şekil 6.6 Yumuşak Çelikler İçin Sünek-Gevrek Geçiş Sıcaklığı T_* ve Tane Boyutu " d " Arasındaki İlişki [Petch]



Şekil 6.7 Sünek-Gevrek Geçiş Sıcaklık Sınırı "T_s" ve Tane Boyutu "d" Arasındaki İlişki.

Sünek-gevrek geçiş sıcaklık sınırı T' ye uygun olan akma gerilim değeri σ_y ve çeliğin tane boyutu d arasındaki ilişki Hall-Petch formülüne göre ifade edilir

$$\sigma_y = \sigma_0 + kd^{-1/2} \quad (6.16)$$

Burada; σ_0 = Dislokasyonların hareketine engel olan gerilimin sıcaklıktan bağımsız olan kısmı (akma gerilimin $d = \infty$ ' a uygun olan değer);

k = Sıcaklıktan bağımsız katsayı.

Formül (6.16)' daki σ_0 ve k parametreleri değerlendirmek için farklı (d_1 ve d_2) tane boyutlu akma gerilimi (σ_{y1} ve σ_{y2}) tayin edilir ve σ_0 ve k parametrelerinin sabitliği kabul edilerek, aşağıdaki formüller k parametresine göre çözülür.

$$\text{a) } \sigma_{y1} = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d_1}} ; \quad \text{b) } \sigma_{y2} = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d_2}} \quad (6.17)$$

Formül (6.17)' den ;

$$k = \frac{\Delta\sigma\sqrt{d_1.d_2}}{\sqrt{d_2} - \sqrt{d_1}} \quad (6.18)$$

$$\sigma_0 = \sigma_{y1} - \frac{\Delta\sigma\sqrt{d_2}}{\sqrt{d_2} - \sqrt{d_1}} \quad \text{veya} \quad \sigma_0 = \sigma_{y2} - \frac{\Delta\sigma\sqrt{d_1}}{\sqrt{d_2} - \sqrt{d_1}} \quad (6.19)$$

Burada; $\Delta\sigma = \sigma_{y1} - \sigma_{y2}$

Elde edilmiş olan k ve σ_0 Formül (6.17)' de yerlerine konulursa akma gerilim ve tane boyutu arasındaki ilişki aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$a) \sigma_y = \sigma_{y1} - \frac{\Delta\sigma\sqrt{d_2}}{(\sqrt{d_2} - \sqrt{d_1})} + \frac{\Delta\sigma\sqrt{d_1d_2}}{(\sqrt{d_2} - \sqrt{d_1})} \cdot \frac{1}{\sqrt{d}}; \quad (6.20)$$

$$b) \sigma_y = \sigma_{y2} - \frac{\Delta\sigma\sqrt{d_1}}{(\sqrt{d_2} - \sqrt{d_1})} + \frac{\Delta\sigma\sqrt{d_1d_2}}{(\sqrt{d_2} - \sqrt{d_1})} \cdot \frac{1}{\sqrt{d}}$$

Buna göre;

$$\sigma_y = \frac{\Delta\sigma\sqrt{d_2}}{(\sqrt{d_2} - \sqrt{d_1})} \left(1 + \sqrt{\frac{d_1}{d}}\right) \text{ veya } \sigma_y = \frac{\Delta\sigma\sqrt{d_1}}{(\sqrt{d_2} - \sqrt{d_1})} \left(1 + \sqrt{\frac{d_2}{d}}\right) \quad (6.21)$$

Formül (6.21)' de; a) $d=d_1$ olur ise; $\sigma_y = \sigma_{y1}$ ve

b) $d=d_2$ olur ise; $\sigma_y = \sigma_{y2}$ olur.

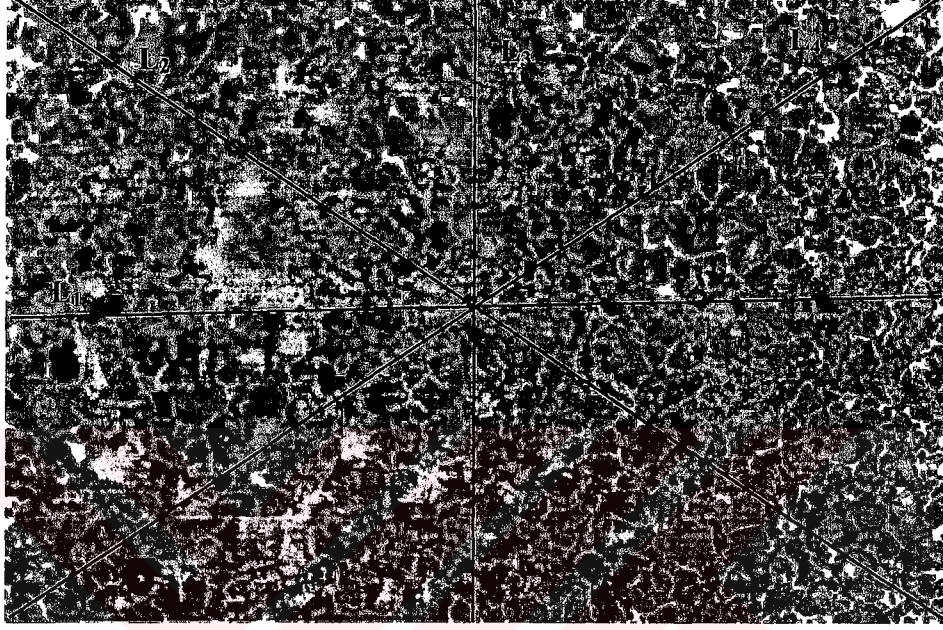
Formül (6.15) ve Formül (6.20)' in deneysel onayı, kimyasal bileşimi Tablo 6.1, Tablo 6.2 ve Tablo 6.3' de verilmiş olan çelikler üzerinde yapılmıştır. Bu çeliklerde farklı boyutlu taneler oluşturmak için uygulanmış olan ısıl işlem rejimleri Tablo 6.4, Tablo 6.5 ve Tablo 6.6' da gösterilmiştir.

6.4 Metalografik İncelemeler ve Ortalama Tane Boyutu Hesabı

Çekme deneyi sonrasında numuneler metalografik inceleme için 13 mm' lik baş kısımlarından kesilerek metalografi laboratuvarında 120 den başlanarak 1200'e kadar olan kademelerde grid SiC zımpara ile zımparalanmıştır. Zımpara işlemi sonrası numuneler 3 μ m' lik elmas pasta ile çuhada parlatılmıştır. Bu işlem sonrası parlatılan numune yüzeyleri nital dağlayıcı ile dağlanarak Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü Metalografi Laboratuvarında bulunan OLYMPUS BX-60 marka optik mikroskopta 100X büyütme de fotoğrafları çekilmiştir.

6.4.1 Ortalama Tane Boyutunun Belirlenmesi

Ortalama tane boyutunu tayin etmek için Şekil 6.8' de gösterildiği gibi 100X büyütme de çekilmiş olan fotoğraf üzerine dört adet çizgi çizilmiştir. Bu çizgilerin kesmiş olduğu tane sınırları sayılarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.8 Çeliklerin ortalama tane boyutunu tayin etmek için kullanılan yöntemin şematik görünüşü.

$$d_{ort} = \frac{L_1 + L_2 + L_3 + L_4}{N_1 + N_2 + N_3 + N_4} \cdot \frac{1}{Q} = \frac{\Sigma L}{\Sigma N} \cdot \frac{1}{Q} \quad (6.22)$$

Burada;
 d_{ort} = Ortalama tane çapı (mm)
 $L_{1,2,3,4}$ = Çizgi uzunlukları (mm)
 $N_{1,2,3,4}$ = Çizgilerin kesmiş olduğu tane sınır sayıları
 Q = Fotoğrafların optik mikroskop büyütme oranı

7. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

7.1 SONUÇLAR

7.1.1 AISI 1030 Çeliği İçin Deneysel Sonuçlar

Tablo 6.1' deki bileşime sahip olan AISI 1030 çeliğinden çekme numunesi hazırlandıktan sonra ve Tablo 6.4' de gösterilmiş olan sıcaklıklarda tam tavlama ısıl işlemleri yapılmıştır. Bu işlemler sonrası deney numuneleri çekme deneyine tabi tutulmuştur.

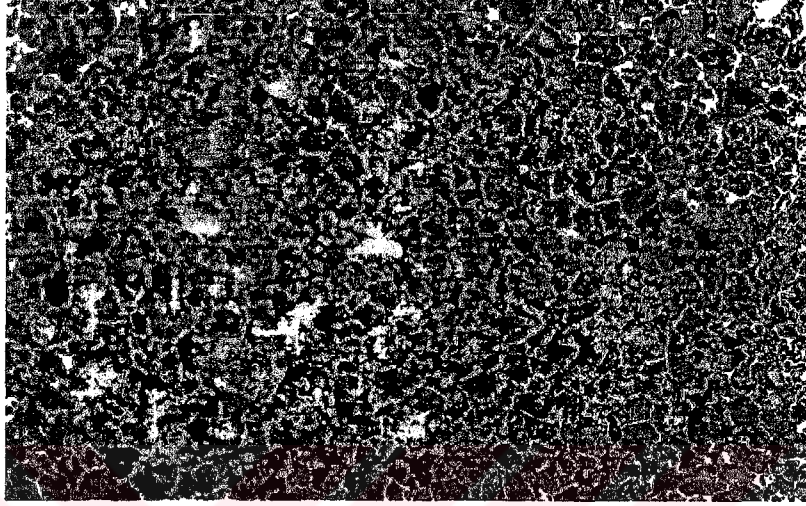
Tablo 7.1, Tablo 7.10 ve Tablo 7.18' de düşük sıcaklıkta tam tavlamadaki akma gerilimleri, yüksek sıcaklıktaki tam tavlamadaki akma gerilimlerine göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum tavlama sıcaklığının ve süresinin artması sonucunda difüzyon işlemi süresinin ve hızının artması ile açıklanabilir. Difüzyon işlemi çeliklerin ortalama tane boyutunu arttırmıştır. Tane boyutundaki artış AISI 1030, AISI 8620 ve AISI 1016 çeliklerinin akma gerilimi ve maksimum çekme gerilimlerinin düşmesine sebep olmaktadır. AISI 1030 çeliğinin her sıcaklık grubu için çekme deneyi numune ölçüleri ve deney sonucu elde edilen sonuçlar Tablo 7.1' de gösterilmiştir.

Tablo 7.1 AISI 1030 Çeliği Çekme Deneyi Numunelerinin Ölçüleri ve Deney Sonuç Verileri.

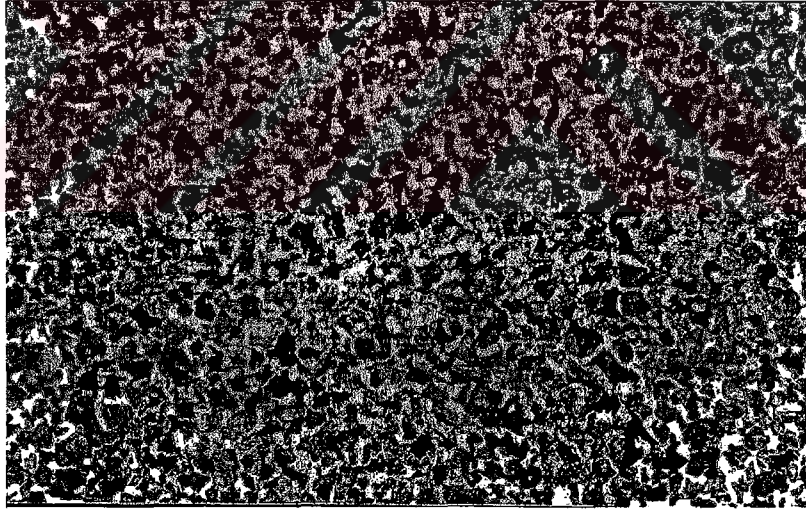
Malzeme ve Nosu	l_0	d_0	A_0	P_a	$P_ç$	P_k	l_k	d_k	A_k	δ	ψ	σ_y	$\sigma_ç$	S_k
	mm	mm	mm ²		kg		mm	mm	mm ²	%			MPa	
0	59,75	5,3	22,05	1127,547	1790,863	1543,262	69,0	3,9	11,939	15,411	45,854	511,359	812,182	1292,622
1-1	59,65	4,85	18,465	904,761	1519,759	1156,701	70,45	3,85	11,635	18,105	36,988	489,987	823,304	994,156
1-2	60,15	4,65	16,973	843,137	1428,879	1268,75	71,65	3,7	10,746	19,118	36,687	496,751	841,185	1180,671
1-3	60,3	5,0	19,625	917,647	1579,217	1355,44	72,55	3,8	11,335	20,315	42,242	467,590	804,696	1195,800
2-1	60,05	4,0	12,56	477,551	849,346	767,12	69,3	3,2	8,038	15,403	36,003	380,215	676,230	954,366
2-2	59,2	4,3	14,514	535,713	974,682	800	70,5	3,275	8,419	19,087	41,993	369,101	671,546	950,231
2-3	61	5,1	20,417	796,57	1527,018	1360,983	70,25	4,00	12,56	15,164	38,482	390,151	747,914	1083,585
3-1	59,75	5,0	19,625	711,111	1523,800	1400	70,35	4,1	13,195	17,740	32,764	362,349	776,458	1061,007
3-2	61,2	5,0	19,625	736,470	1535,941	1400	71,95	4,15	13,519	17,565	31,113	375,271	782,645	1035,579
3-3	60,0	4,9	18,847	675,068	1323,809	1185,701	70,55	3,9	11,939	17,583	36,653	358,183	702,239	993,132

AISI 1030 Çeliğinin Tane Boyutunun Değerlendirilmesi

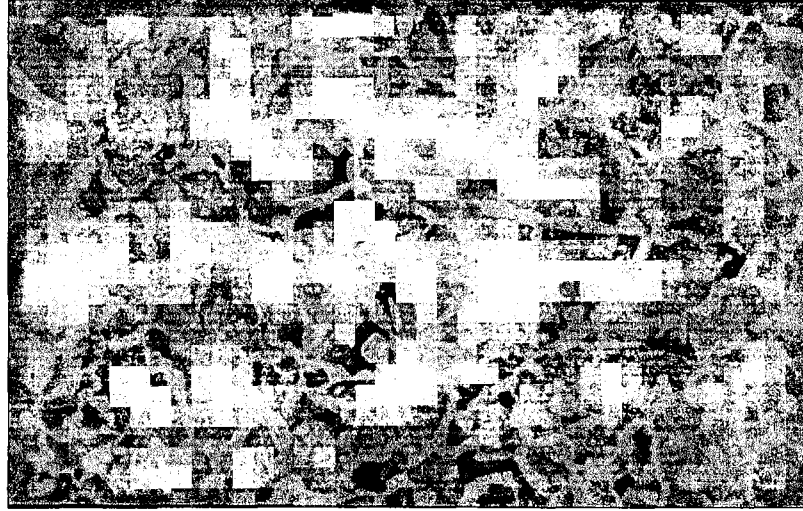
Aşağıdaki şekillerde farklı sıcaklıklarda tam tavlama işlemine tabi tutulan AISI 1030 çeliğinin iç yapı resimleri gösterilmiştir. Tam tavlama sıcaklığının ve süresinin artması ile çeliklerin ortalama tane boyutları artmıştır.



Şekil 7.1 AISI 1030 Çeliğinin Satıldığı Durumdaki Mikroyapı Fotoğrafi (100X).



Şekil 7.2 AISI 1030 Çeliğinin 900 °C' de 1 Saat Tam Tavlanmış Mikroyapı Fotoğrafi (100X).



Şekil 7.3 AISI 1030 Çeliğinin 1100 °C' de 1,5 Saat Tam Tavlanmış Mikroyapı Fotoğrafi (100X).



Şekil 7.4 AISI 1030 Çeliğinin 1300 °C' de 2,5 Saat Tam Tavlanmış Mikroyapı Fotoğrafi (100X).

Mikroyapı fotoğraflarına bakıldığında tam tavlama sıcaklığının ve bekletme süresindeki artış neticesinde numunelerde belirgin bir şekilde tane artışı meydana gelmiştir. Bu durumda tam tavlama sıcaklığındaki ve bekletme süresindeki artış ile difüzyon etkisinin büyük bir faktör olduğu ön plana çıkmaktadır.

AISI 1030 çeliği için mikroyapı; karbon miktarının AISI 8620 ve AISI 1016 çeliklerine oranla yüksek olması nedeni ile yapı ağırlıklı olarak perlitiktir. Perlit taneleri etrafında ise tane sınırı ferrit yerleştiği mikroyapı fotoğraflarından görülmektedir. Perlit tane boyutu tam tavlama sıcaklığının ve bekletme süresinin artması ile doğru orantılı olarak artmıştır.

Formül (6.22)' ye göre hesaplanan AISI 1030 çeliklerinin tane boyutları Tablo 7.2' de verilmiştir.

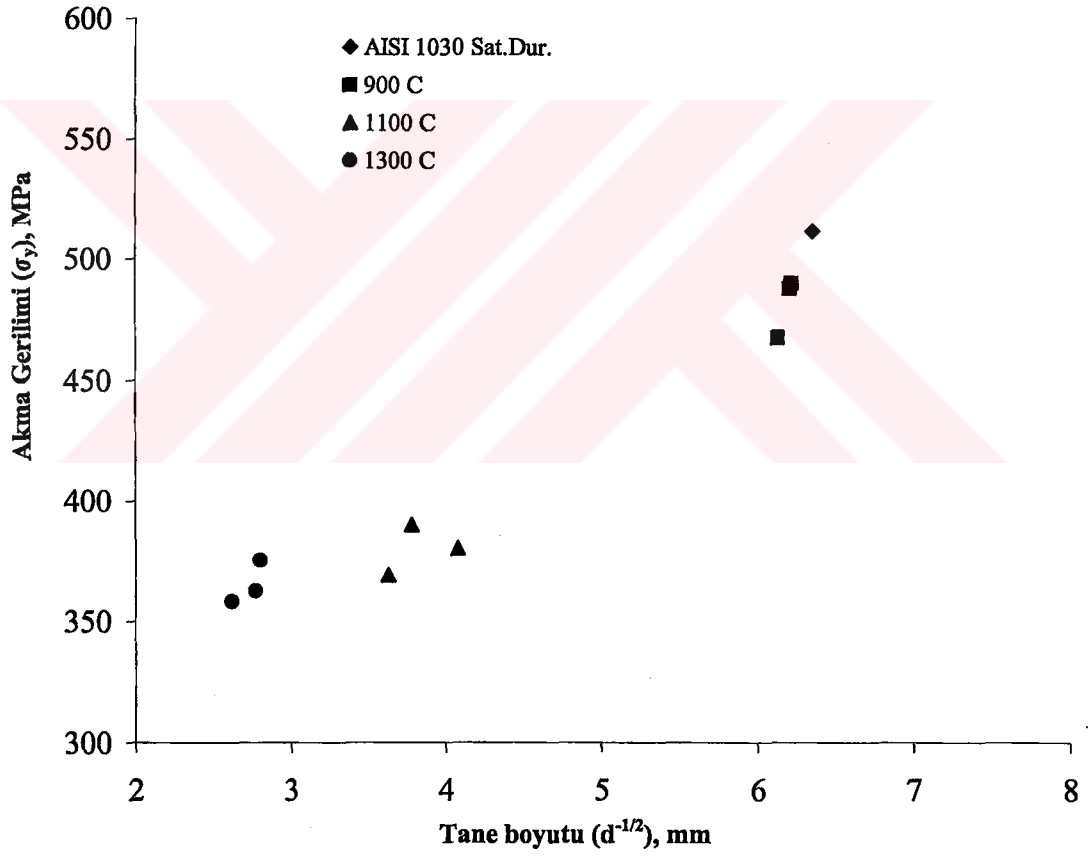
Tablo 7.2 AISI 1030 Çeliği İçin Isıl İşlem Çeşidi, Akma Gerilimi ve Tane Boyutu Değerleri.

Malzeme	Tavlama Sıcaklığı (°C)	Bekletme Süresi (Saat)	Soğutma Ortamı	Isıl İşlem Çeşidi	Akma Gerilimi (σ_y), MPa	Tane Boyutu (d. 10^{-3}), mm
AISI 1030	-	-	-	Satıldığı Durum	511,359	24,717
AISI 1030 / 1.1	900	1	Fırında Soğutma	Tam Tavlama	489,987	25,756
AISI 1030 / 1.2	900	1	Fırında Soğutma	Tam Tavlama	496,751	25,864
AISI 1030 / 1.3	900	1	Fırında Soğutma	Tam Tavlama	467,590	26,536
AISI 1030 / 2.1	1100	1,5	Fırında Soğutma	Tam Tavlama	380,215	60,098
AISI 1030 / 2.2	1100	1,5	Fırında Soğutma	Tam Tavlama	369,101	75,679
AISI 1030 / 2.3	1100	1,5	Fırında Soğutma	Tam Tavlama	390,151	69,659
AISI 1030 / 3.1	1300	2,5	Fırında Soğutma	Tam Tavlama	362,349	130,425
AISI 1030 / 3.2	1300	2,5	Fırında Soğutma	Tam Tavlama	375,271	127,708
AISI 1030 / 3.3	1300	2,5	Fırında Soğutma	Tam Tavlama	358,183	145,952

Tablo 7.3' de AISI 1030 Çeliği için uygulanan sıcaklık rejimleri, tane boyutu ve akma gerilimi değerleri gösterilmiştir. Şekil 7.5' de Tablo 7.3' deki değerlere göre çizilmiş olan AISI 1030 çeliği için tane boyutu ve akma gerilimi arasındaki ilişkiyi gösteren grafik verilmiştir.

Tablo 7.3 AISI 1030 Çeliği için Uygulanan Sıcaklık Rejimleri, Tane Boyutu ve Akma Gerilimi Değerleri.

Malzeme ve Uygulanan Sıcaklık Rejimleri	Tane Boyutu ($d^{-1/2}$), mm	Akma Gerilimi (σ_y), MPa
AISI 1030 Sat. Dur.	6,36	511,854
900 °C	6,231	489,987
900 °C	6,218	487,987
900 °C	6,138	467,59
1100 °C	4,079	380,215
1100 °C	3,635	369,101
1100 °C	3,788	390,151
1300 °C	2,768	362,349
1300 °C	2,798	375,271
1300 °C	2,617	358,183

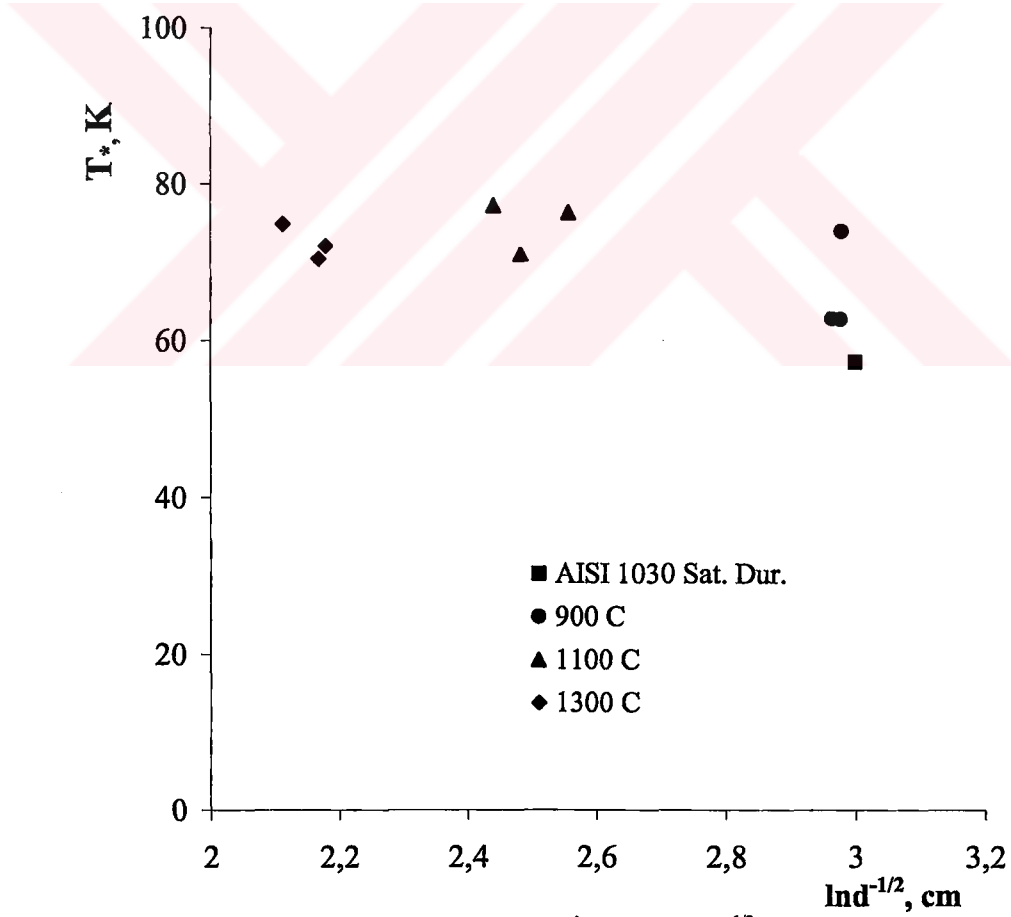


Şekil 7.5 AISI 1030 Çeliği için Akma Gerilimi ve Tane Boyutu İlişkisi.

AISI 1030 çeliği için T_* sıcaklıkları ve tane boyutu değerleri Tablo 7.4' de ve bunlar arasındaki ilişkiyi gösteren logaritmik grafik Şekil 7.6' da gösterilmiştir.

Tablo 7.4 AISI 1030 Çeliği İçin T_* ve Tane Boyutu ($\ln d^{-1/2}$) Değerleri.

Malzeme ve No'su	$\ln d^{-1/2}$, cm	T_* , K
AISI 1030	3,001	57,261
900 C	2,98	73,962
900 C	2,978	62,656
900 C	2,965	62,764
1100 C	2,557	76,333
1100 C	2,441	77,214
1100 C	2,483	71,895
1300 C	2,169	70,426
1300 C	2,18	72,091
1300 C	2,113	74,836

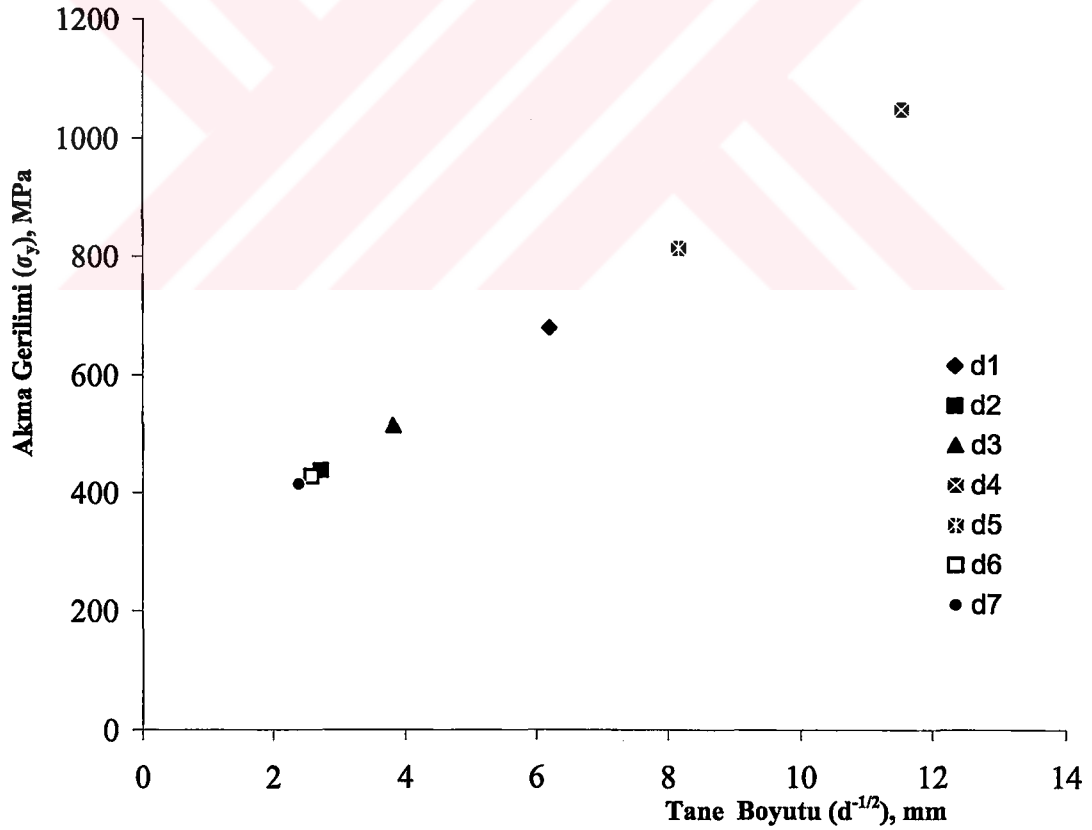


Şekil 7.6 AISI 1030 Çeliği İçin T_* ve $\ln d^{-1/2}$ Grafiği.

AISI 1030 çeliği için Formül (6.17), (6.18), (6.19), (6.20)' ye göre elde edilmiş olan değerler Tablo 7.5' de verilmiştir. Çeşitli tane boyutlarındaki akma gerilimi değerleri arasındaki ilişki Şekil 7.7' de gösterilmiştir.

Tablo 7.5 AISI 1030 Çeliği için Formül (6.18) ve (6.20)' ye Göre Çeşitli Tane Boyutları (d) İçin Elde Edilmiş Olan σ_y Değerleri Tablosu.

AISI 1030 Çeliği için	σ_{y0}	σ_0	d_1	d_2	d	k	σ_{y1}	σ_{y2}	σ_y
	MPa		$d \cdot 10^{-3}, \text{mm}$			$MPa \cdot \sqrt{m}$	MPa		
900 C	484,776	460,695	25,952	-	-	1,085	679,381	429,590	514,252
1300 C	365,267	342,381	-	134,695	-				
d3 (1100 C)	-	-	-	-	68,478		-	-	-
d4	d4, d5, d6 ve d7 formül (6.20)' de "d" parametresi için rastgele alınmış ortalama tane boyutu değerleridir.				7,50		-	-	1048,901
d5					15,0		-	-	814,847
d6					150,0		-	-	428,477
d7					175,0		-	-	415,222



Şekil 7.7 AISI 1030 Çeliği İçin Çeşitli Tane Boyutları ile Akma Gerilimi Arasındaki İlişkiyi Gösteren Grafik.

AISI 1030 Çeliği İçin MATLAB Hesaplamaları

Çekme deneyi sonucu elde edilmiş olan değerler ile hesaplanan tane boyutu değerleri vasıtasıyla Aytekin' in (2005) tez çalışmasında kullanmış olduğu MATLAB 6.5 programında her bir çelik numunesinin mekanik özellikleri tespit edilerek grafikler çizdirilmiştir.

MATLAB 6.5 matematiksel programına çeliklerin mekanik özelliklerini tespit etmek için girilen değerler AISI 1030 çeliği için bir örnek olarak Tablo 7.6' da gösterilmiştir.

Tablo 7.6 AISI 1030 Çeliğinin Satıldığı Durum İçin MATLAB Hesaplamaları İçin Programa Girilen Malzeme Özellikleri.

Malzeme	S_{kop}	σ_{y0}	β_y	d	σ_1	σ_5	Δ	l_0
	MPa			μm	MPa		mm	
AISI 1030 Sat.Dur.	1292.622	511.359	66	24,717	636,802	854,493	0,843	59,75

Tablo 7.6' da verilen değerlerin programda girilmesi ile çeliklere ait mekanik özellikleri ve kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi, akma geriliminin sıcaklıkla değişimi, S_{ft}/σ_y 'nin sıcaklıkla değişimi ve $\ln(\sigma_y/\sigma_0)$ 'nin sıcaklıkla değişim grafikleri de elde edilebilmektedir. AISI 1030, AISI 8620 ve AISI 1016 çelikleri için elde edilmiş olan mekanik özellikler ve grafikler ekte sunulacaktır.

AISI 1030 çeliği için MATLAB programı hesaplama sonuçları elde edilmiş olan değerler AISI 1030 çeliği için Tablo 7.7' de verilmiştir.

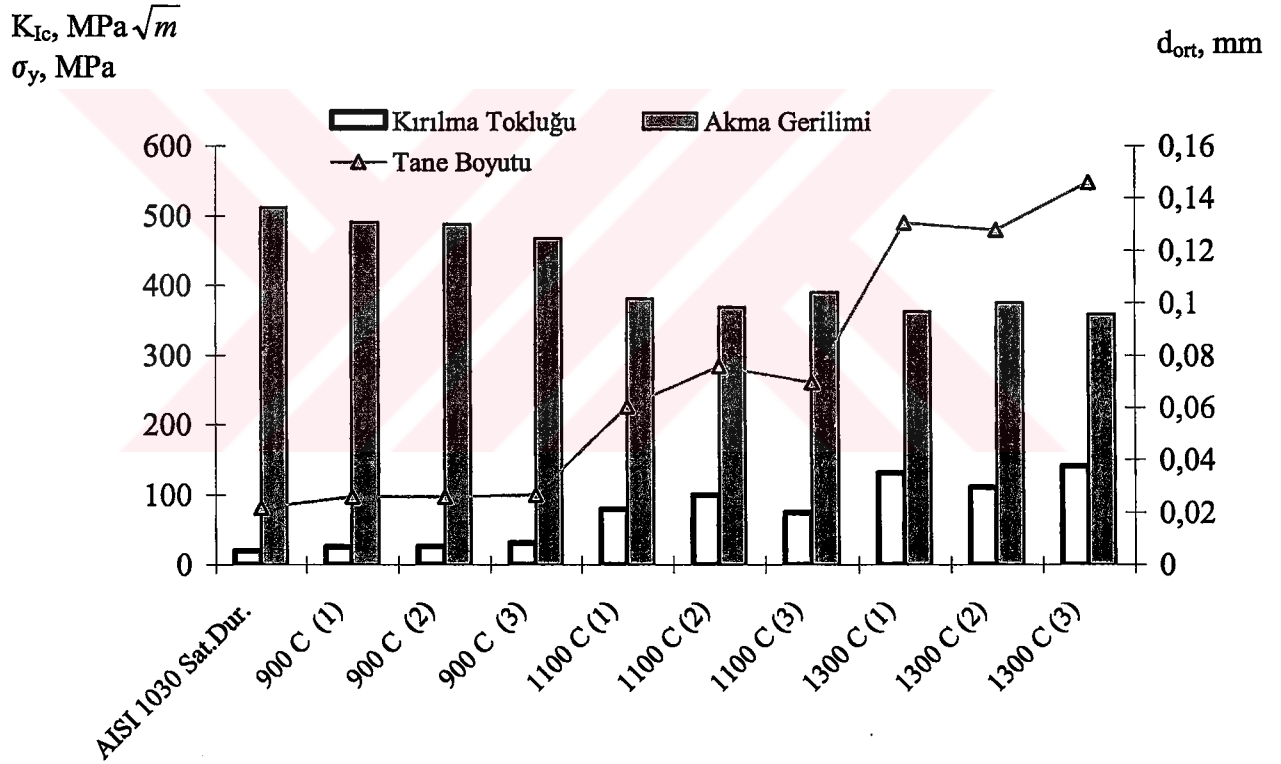
MATLAB hesaplamaları sonucu elde edilen değerler vasıtası ile AISI 1030 Çeliği için Akma Gerilimi, Kırılma Tokluğu ve Tane Boyutu değerleri Tablo 7.8' de verilmiştir. Bu tabloya göre çizilmiş olan grafik ise Şekil 7.8' de gösterilmiştir.

Tablo 7.7 AISI 1030 Çeliği için MATLAB Programı ile Elde Edilen Sonuçlar.

Malzeme ve Uygulanan Isıl İşlem Rejimleri	$\alpha \times 10^{-2}$	σ_0	S_{tr}	A	T_s	T'	d	K_{1c}^0	K_{1c}	n	χ	β_y
	K^{-1}	MPa	MPa	K	$10^3, \text{mm}$	$MPa \sqrt{m}$	$MPa \sqrt{m}$	K	0,2201	-	-	K
AISI 1030 - Satıldığı durum	1,20	487,363	932,435	883,947	57,261	293	24,717	7,789	20,373	0,2201	1,7719	66
AISI 1030-900 °C /1 saat Tam tavlama (1)	1,21	465,960	840,485	915,893	73,962	293	25,756	8,238	26,182	0,2116	1,8635	70
AISI 1030-900 °C /1 saat Tam tavlama (2)	1,21	472,651	900,391	910,846	62,656	293	25,864	8,210	26,666	0,2033	1,9590	69
AISI 1030-900 °C /1 saat Tam tavlama (3)	1,22	443,476	888,950	959,506	62,764	293	26,536	8,760	31,291	0,2188	1,7847	75
AISI 1030-1100 C/1,5saat Tam tavlama (1)	1,28	357,155	768,825	1090,6	76,333	293	60,098	14,985	79,654	0,2385	1,5968	95
AISI 1030-1100 C/1,5saat Tam tavlama (2)	1,29	346,116	763,117	1125,5	77,131	293	75,679	17,3546	99,6037	0,2406	1,5784	99
AISI 1030-1100 C/1,5saat Tam tavlama (3)	1,27	366,814	801,801	1084,7	71,895	293	69,659	16,0462	74,251	0,2489	1,5090	93
AISI 1030-1300 °C/2,5saat Tam tavlama (1)	1,29	339,498	793,284	1138,6	71,173	293	130,425	23,0472	130,677	0,2467	1,5264	101
AISI 1030-1300 °C/2,5saat Tam tavlama (2)	1,28	352,052	795,565	1127,1	72,617	293	127,708	22,5766	110,499	0,2558	1,4543	98
AISI 1030-1300 °C/2,5saat Tam tavlama (3)	1,29	335,595	767,968	1125,5	74,018	293	145,952	24,100	141,460	0,2431	1,5568	101

Tablo 7.8 AISI 1030 Çeliği İçin Akma Gerilimi, Tane Boyutu Ve MATLAB Hesaplamaları Sonucu Elde Edilen Kırılma Tokluğu Değerleri.

Malzeme ve Isıl İşlem Durumları	Kırılma Tokluğu	Akma Gerilimi	Tane Boyutu
	$MPa\sqrt{m}$	MPa	mm
AISI 1030 Sat.Dur.	20,373	511,854	0,0217
900 C (1)	26,182	489,987	0,0257
900 C (2)	26,666	487,987	0,0258
900 C (3)	31,291	467,59	0,0265
1100 C (1)	79,654	380,215	0,0600
1100 C (2)	99,6037	369,101	0,0756
1100 C (3)	74,251	390,151	0,0696
1300 C (1)	130,677	362,349	0,130
1300 C (2)	110,499	375,271	0,127
1300 C (3)	141,46	358,183	0,145

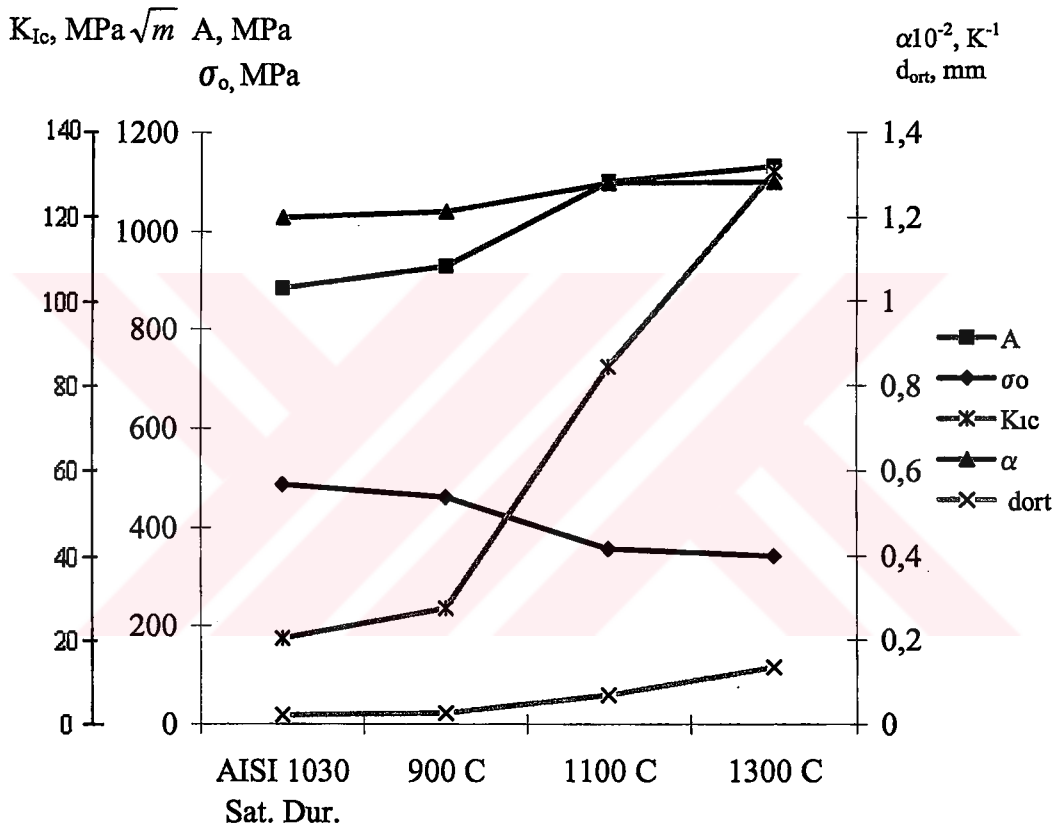


Şekil 7.8 AISI 1030 Çeliği İçin Akma Gerilimi, Kırılma Tokluğu ve Tane Boyutu İlişkisi.

MATLAB hesaplamaları sonucu elde edilmiş olan A , σ_o , K_{Ic} , α ve tane boyutu d değerleri Tablo 7.9 'da ve K_{Ic} değerinin optimum değerinin elde edilmesi için gerekli olan bu değerler arasındaki ilişki ise Şekil 7.9' de gösterilmiştir.

Tablo 7.9 AISI 1030 Çeliği İçin MATLAB Hesaplamaları Sonucu Elde Edilen A , σ_0 , K_{Ic} , α ve Tane Boyutu " d " Değerleri.

Malzeme ve tam tavlama sıcaklığı	A	σ_0	K _{Ic}	$\alpha 10^{-2}$	d_{ort}
	MPa	MPa	$MPa\sqrt{m}$	K^{-1}	mm
AISI 1030 Sat. Dur.	883,947	487,363	20,373	1,20	0,0217
900 C	928,748	460,695	28,046	1,213	0,0259
1100 C	1100,267	356,695	84,502	1,28	0,0684
1300 C	1130,4	342,381	127,545	1,283	0,134



Şekil 7.9 AISI 1030 için A , σ_0 , K_{Ic} , α ve tane boyutu " d " arasındaki ilişki grafiği

7.1.2 AISI 8620 Çeliği İçin Deneysel Sonuçlar

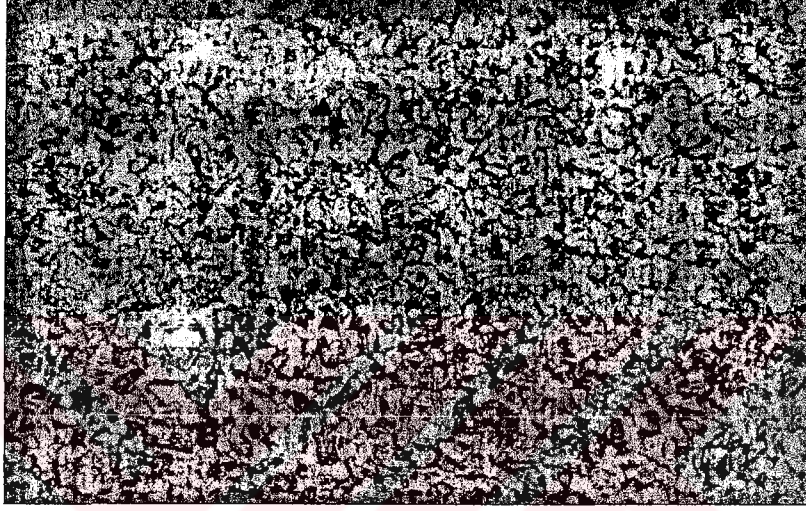
Tablo 6.2' deki bileşime sahip olan AISI 8620 çeliği öncelikle çekme deney numunesi ölçülerine getirilmiştir. Hazırlanan çekme deney numunelerine Tablo 6.5' de gösterilmiş olan sıcaklıklarda tam tavlama ısıl işlemleri yapılmıştır. Bu işlemler sonrası deney numuneleri çekme deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonucu elde edilmiş olan değerler Tablo 7.10' da gösterilmiştir.

Tablo 7.10 AISI 8620 Çeliği Denen Numunelerinin Ölçüleri ve Deney Sonuçları.

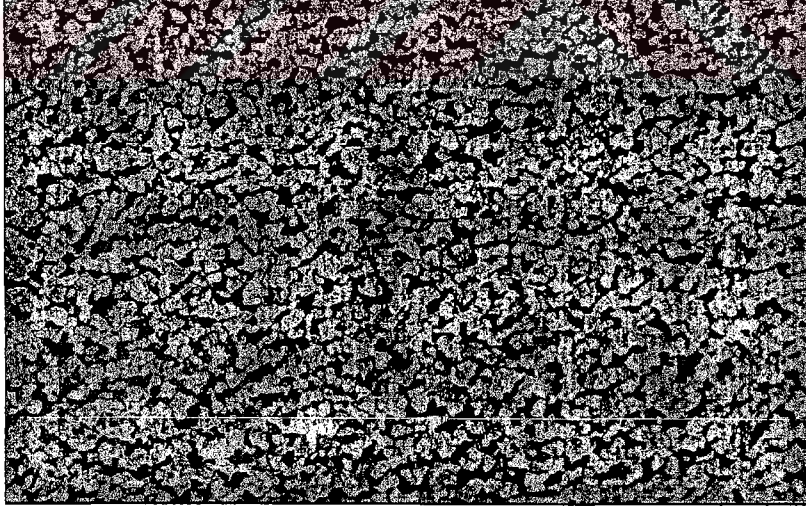
Malzeme ve Nosu	l ₀ mm	d ₀ mm	A ₀ mm ²	P _a	P _ç kg	P _k	l _k mm	d _k mm	A _k mm ²	δ %	ψ	σ _y	σ _ç	S _k
0	59,15	5,1	20,417	1090,909	1365,784	972,826	69,2	3,05	7,302	14,523	64,235	504,314	668,944	1332,273
1-1	60,1	4,9	18,847	800	1108,471	800	73,3	2,9	6,601	18,008	64,975	424,470	588,141	1211,937
1-2	59,7	4,9	18,847	765,714	1097,146	765,714	73,85	2,75	5,936	19,160	68,504	406,278	582,132	1289,949
1-3	61,05	4,95	19,234	836,283	1122,204	777,931	75,75	2,8	6,154	19,405	68,004	434,794	583,448	1264,106
2-1	62,4	4,35	14,854	443,243	733,927	486,486	76,6	2,3	4,152	18,537	72,047	298,840	494,093	1171,690
2-2	61,05	4,4	15,197	450,285	748,799	517,358	74,15	2,4	4,521	17,666	70,250	296,298	492,728	1144,344
3-1	60,8	4,85	18,465	514,285	861,944	504,905	76,8	2,85	6,376	20,833	65,469	278,518	466,798	791,883
3-2	60,55	4,9	18,847	515,675	867,236	512,152	74,7	2,7	5,722	18,942	69,639	273,611	460,145	895,057
3-3	59,9	4,85	18,465	463,157	754,499	452,631	73,7	2,6	5,306	18,724	71,264	250,829	408,610	853,055

AISI 8620 Çeliğinin Tane Boyutunun Belirlenmesi

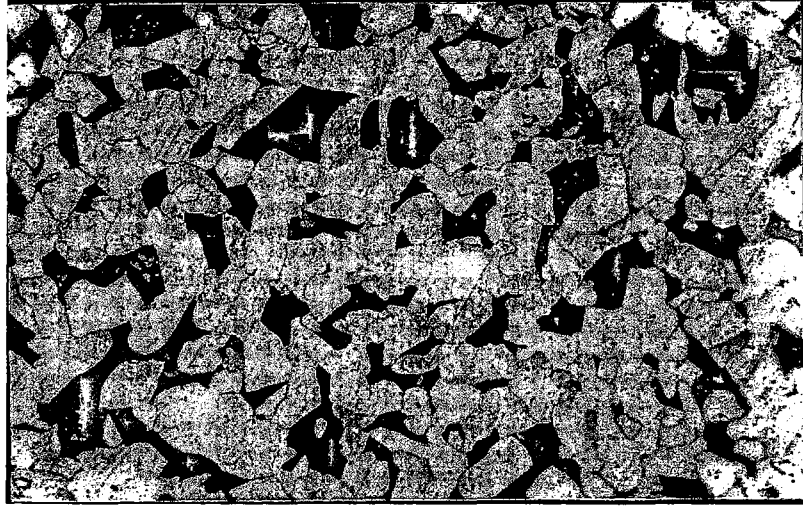
Tablo 6.5' deki gibi Fe-Fe₃C faz diyagramında östenitleme bölgesinde belirlenmiş olan sıcaklıklarda numunelere tam tavlama işlemi uygulanmıştır. Uygulanan ısıl işlem sonrası çekme deneyi numunelerinden mikro yapı incelemesi ve tane boyutu hesaplamaları için optik mikroskop numuneleri hazırlanmıştır ve hazırlanan numunelerden 100X büyütmede fotoğraflar çekilmiştir. AISI 8620 için mikro yapı fotoğrafları aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



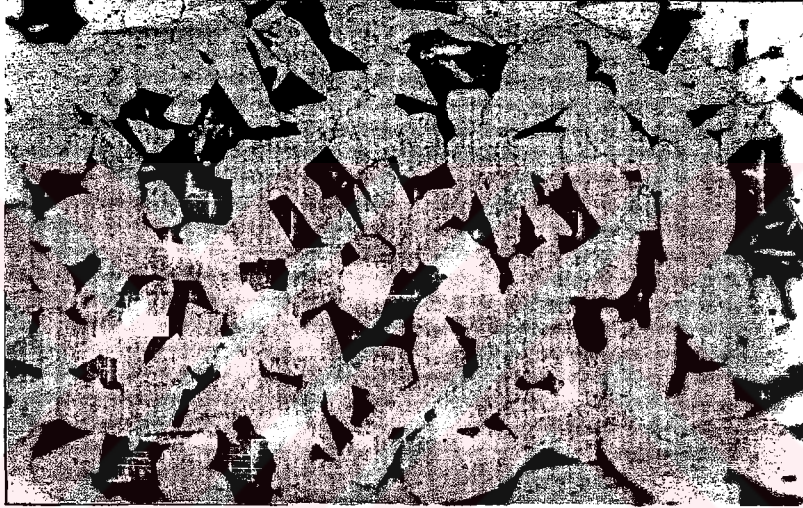
Şekil 7.10 AISI 8620 Satıldığı Durumdaki Mikro Yapı Fotoğrafı (100X).



Şekil 7.11 AISI 8620 Çeliğinin 950 °C' de 1 Saat Tam Tavlanmış Mikroyapı Fotoğrafı (100X).



Şekil 7.12 AISI 8620 Çeliğinin 1150 °C' de 1,5 Saat Tam Tavlanmış Mikroyapı Fotoğrafi (100X).



Şekil 7.13 AISI 8620 Çeliğinin 1300 °C' de 2,5 Saat Tam Tavlanmış Mikroyapı Fotoğrafi (100X).

Sementasyon çeliği grubuna giren AISI 8620 çeliğinin optik mikroskop analizleri sonucu görüldüğü üzere karbon miktarının AISI 1030 çeliğine göre düşük olması nedeni ile perlit miktarı AISI 1030 çeliğinden azdır. Aynı şekilde fotoğraflardan görüldüğü üzere tane boyutu AISI 1030 çeliğinden küçüktür.

Optik mikroskopta fotoğrafları çekilen AISI 8620 deney numuneleri formül (6.20)' e göre tane boyutu hesaplanmıştır. Akma gerilimi ve tane boyutu değerleri Tablo 7.11' de verilmiştir.

Tablo 7.11 AISI 8620 Çeliği İçin Isıl İşlem Çeşidi, Akma Gerilimi ve Tane Boyutu Değerleri.

Malzeme	Tavlama Sıcaklığı (°C)	Bekletme Süresi (Saat)	Soğutma Ortamı	Isıl İşlem Çeşidi	Akma Gerilimi (σ_y), MPa	Tane Boyutu (d. 10^{-3}), mm
AISI 8620	-	-	-	Satıldığı Durum	504,314	17,075
AISI 8620 / 1.1	950	1	Fırında Soğutma	Tam Tavlama	424,470	21,971
AISI 8620 / 1.2	950	1	Fırında Soğutma	Tam Tavlama	406,278	24,039
AISI 8620 / 1.3	950	1	Fırında Soğutma	Tam Tavlama	434,794	23,852
AISI 8620 / 2.1	1150	1,5	Fırında Soğutma	Tam Tavlama	298,840	55,225
AISI 8620 / 2.2	1150	1,5	Fırında Soğutma	Tam Tavlama	296,298	54,247
AISI 8620 / 3.1	1300	2,5	Fırında Soğutma	Tam Tavlama	278,518	61,919
AISI 8620 / 3.2	1300	2,5	Fırında Soğutma	Tam Tavlama	273,611	68,111
AISI 8620 / 3.3	1300	2,5	Fırında Soğutma	Tam Tavlama	250,829	71,279

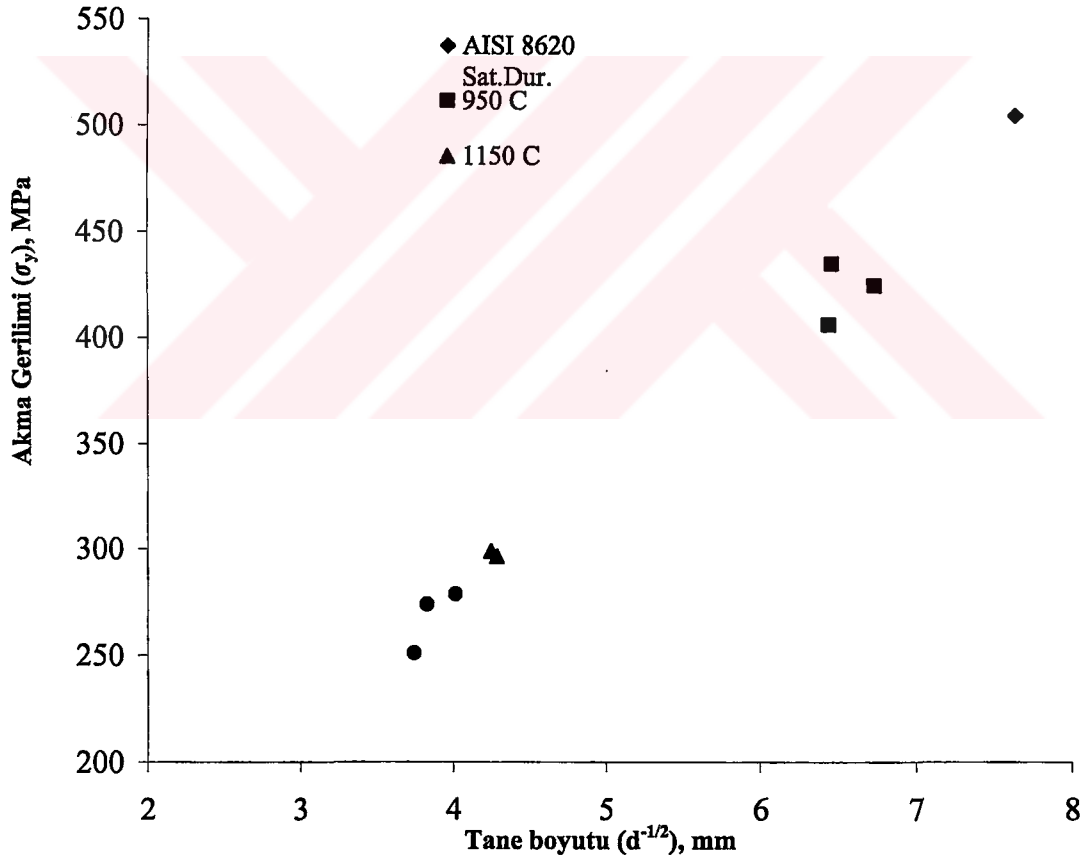
Tablo 7.11’ de akma gerilimi ve tane boyutu değerlerine bakıldığında AISI 8620 çeliği nispeten AISI 1030 çeliğine göre daha düşük tane boyutu ve akma gerilimi değerleri vermiştir. AISI 1016 çeliğine göre ise ortalama tane boyutu yaklaşık olarak aynı iken akma gerilimi değerleri nispeten yüksektir.

Tablo 7.12’ de AISI 8620 için değişik tam tavlama sıcaklıklarındaki tane boyutları ve akma gerilim değerleri verilmiştir. Şekil 7.14’ de Tablo 7.12’ e uygun olarak akma gerilimi ve tane boyutu ilişki şematik olarak gösterilmiştir.

Formül (6.17), (6.18), (6.19), (6.20)’ e göre AISI 8620 çeliği için elde edilmiş olan değerler Tablo 7.14’ de verilmiştir. Değişik tane boyutlarındaki akma gerilimi değerleri arasındaki ilişki Şekil 7.16’ da gösterilmiştir.

Tablo 7.12 AISI 8620 Çeliği İçin Uygulanan Sıcaklık Rejimleri, Tane Boyutu ve Akma Gerilimi Değerleri.

Malzeme ve Uygulanan Sıcaklık Rejimleri	Tane boyutu ($d^{-1/2}$), mm	Akma gerilimi (σ_y), MPa
AISI 8620 Sat. Dur.	7,652	504,314
950 C	6,746	424,470
950 C	6,449	406,278
950 C	6,474	434,794
1150 C	4,255	298,840
1150 C	4,293	296,298
1300 C	4,018	278,518
1300 C	3,831	273,611
1300 C	3,745	250,829

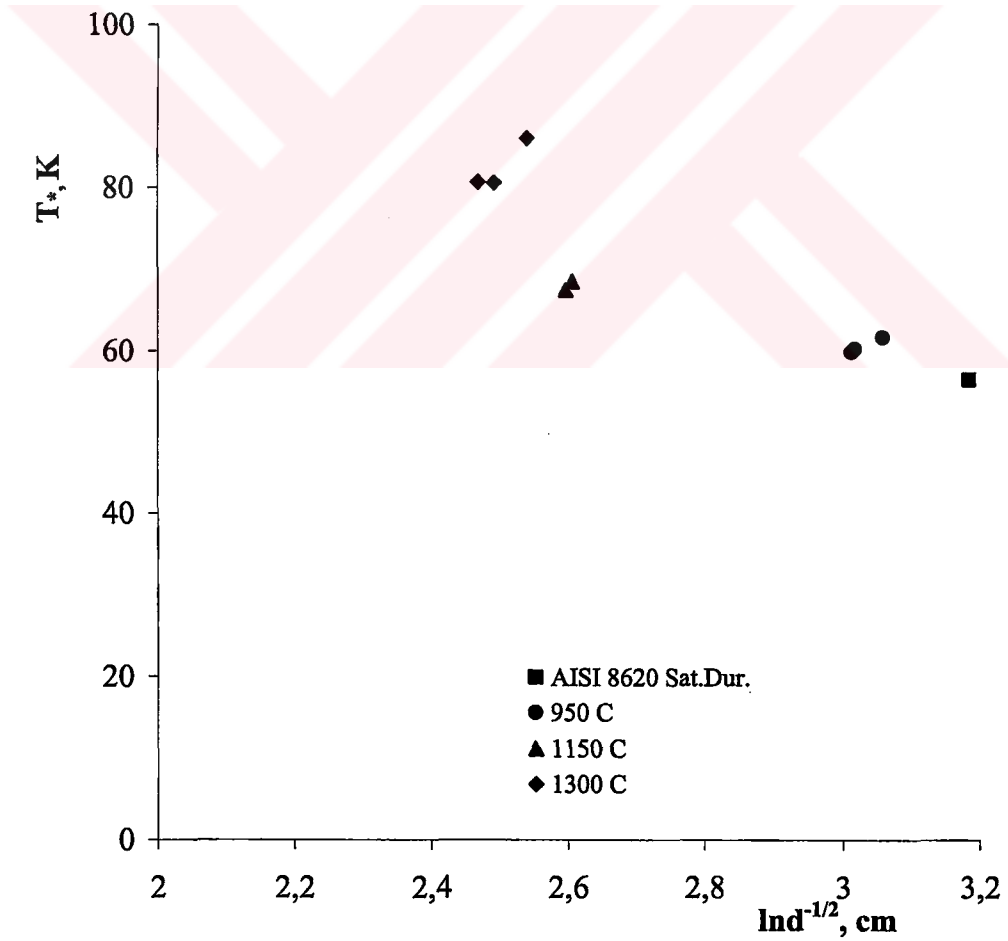


Şekil 7.14 AISI 8620 Çeliği için Akma Gerilimi ve Tane boyutu arasındaki ilişki.

AISI 8620 çeliği için T_* sıcaklıkları ve tane boyutu değerleri Tablo 7.13' de ve Tablo 7.13' de ki tane boyutu ve T_* değerleri dikkate alınarak çizilmiş olan grafik Şekil 7.15' de gösterilmiştir.

Tablo 7.13 AISI 8620 Çeliği İçin T_* ve Tane Boyutu ($\ln d^{-1/2}$) Değerleri.

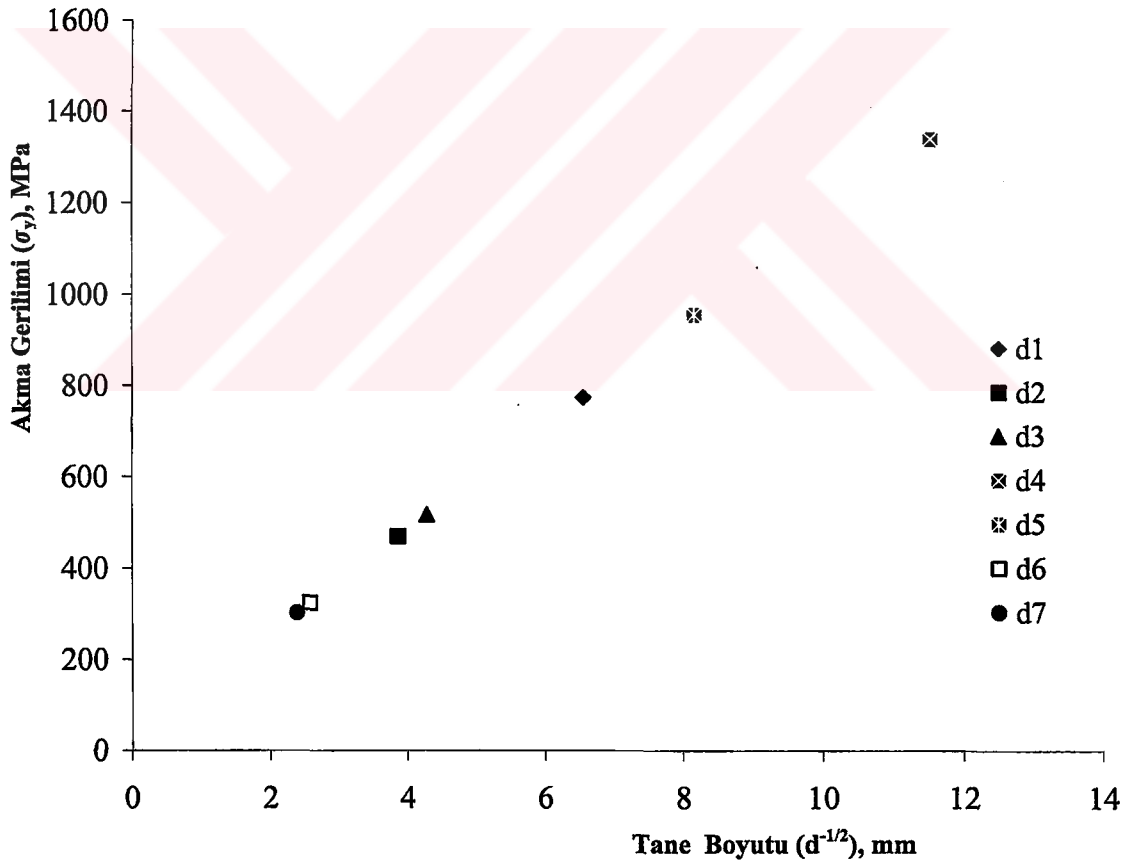
Malzeme ve No'su	$\ln d^{-1/2}$, cm	T_* , K
AISI 8620	3,186	56,5
950 C	3,06	61,700
950 C	3,015	59,907
950 C	3,019	60,281
1150 C	2,599	67,573
1150 C	2,608	68,586
1300 C	2,542	86,092
1300 C	2,494	80,647
1300 C	2,471	80,779



Şekil 7.15 AISI 8620 Çeliği İçin T_* ve $\ln d^{-1/2}$ Grafiği.

Tablo 7.14 AISI 8620 Çeliği için Formül (6.18) ve (6.20)' e Göre Çeşitli Tane Boyutları (d) İçin Elde Edilmiş Olan σ_y Değerleri Tablosu.

AISI 8620 Çeliği için	σ_{y0}	σ_0	d_1	d_2	d	k	σ_{y1}	σ_{y2}	σ_y	
	MPa		$d \cdot 10^{-3}, \text{mm}$			$\text{MPa} \sqrt{m}$	MPa			
950 C	421,847	398,432	23,287	-	-	1,810	773,685	469,082	515,901	
1300 C	267,652	248,022	-	54,736	-					
d3 (1150 C)	-	-	-	-	67,103		-	-		
d4	d4, d5, d6 ve d7 formül (6.20)' de "d" parametresi için rastgele alınmış ortalama tane boyutu değerleridir.						7,5	-	-	1338,606
d5							15,0	-	-	956,023
d6							150,0	-	-	324,465
d7							175,0	-	-	302,799



Şekil 7.16 AISI 8620 İçin Çeşitli Tane Boyutları İçin Akma Geriliminin Değişimi.

AISI 8620 Çeliği İçin MATLAB Hesaplamaları

AISI 8620 eliği için MATLAB 6.5 programı ile hesaplanmış olan kırılma tokluk değerleri ve kırılma tokluğuna etki eden parametre değerleri Tablo 7.15' de gösterilmiştir.

Tablo 7.15' deki değerler dikkate alınarak AISI 8620 eliği için Şekil 7.17' de akma gerilimi, kırılma tokluğu ve tane boyutu arasındaki değişim grafiği gösterilmiştir. Şekil 7.17' deki akma gerilimi, kırılma tokluğu ve tane boyu değerleri Tablo 7.16' da verilmiştir.

Üç elik için akma geriliminin azalması ve tane boyutunun artması ile kırılma tokluğunda belirgin bir artış görülmektedir. Bu durum AISI 8620 eliği için Şekil 7.17' de görülebilmektedir.

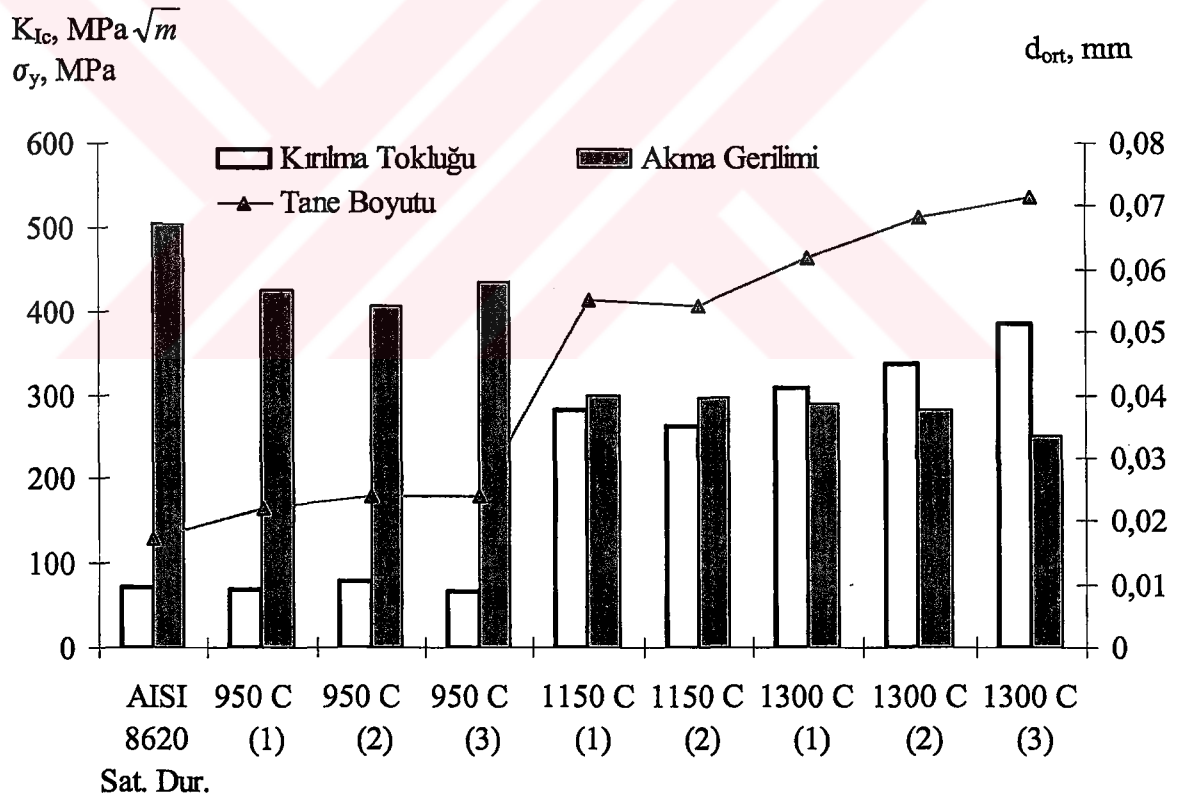
Tablo 7.16' daki kırılma tokluğuna etki eden A , σ_o , K_{1c} , α ve tane boyutu "d" parametre değerlerinin kırılma tokluğuna etkisi Şekil 7.18' de gösterilmiştir. Grafikteki parametre değerleri Tablo 7.17' de verilmiştir.

Tablo 7.15 AISI 8620 Çeliği İçin MATLAB Programı İle Elde Edilen Sonuçlar.

Malzeme ve Uygulanan Isıl İşlem Rejimleri	$\alpha \times 10^{-2}$	σ_0	S_{lr}	A	T.	T*	d	K_{lc}^0	K_{Ic}	n	χ	β_y
	K ⁻¹	MPa	MPa	K	K	10 ⁻³ , mm	MPa \sqrt{m}	MPa \sqrt{m}	-	-	K	
AISI 8620 - Sahlıldığı durum	1,20	480,112	939,531	906,911	56,500	293	17,075	6,642	70,946	0,1094	4,069	68
AISI 8620-950 °C/1saat Tam tavlama (1)	1,24	401,151	859,329	985,506	61,700	293	21,971	8,1876	69,3803	0,1636	2,5558	82
AISI 8620-950 °C/1saat Tam tavlama (2)	1,25	383,033	866,732	1025,7	59,907	293	24,039	8,9139	79,9034	0,1733	2,3853	87
AISI 8620-950 °C/1saat Tam tavlama (3)	1,24	411,112	881,401	992,282	60,281	293	23,852	8,5896	67,315	0,1659	2,5137	81
AISI 8620-1150 C/1,5saat Tam tavlama (1)	1,34	277,973	773,232	1228,0	67,573	273,025	55,225	16,1745	282,343	0,2055	1,9326	120
AISI 8620-1150 °C/1,5saat Tam tavlama (2)	1,35	275,514	765,540	1233,9	68,586	274,316	54,247	16,1086	261,762	0,2107	1,8730	121
AISI 8620-1300 °C/2,5saat Tam tavlama (1)	1,37	258,382	650,901	1271,7	86,092	293	61,919	17,7365	308,244	0,2088	1,8942	128
AISI 8620-1300 °C/2,5saat Tam tavlama (2)	1,37	253,591	682,469	1298,4	80,647	293	68,111	18,9930	337,025	0,2118	1,8608	131
AISI 8620-1300 °C/2,5saat Tam tavlama (3)	1,39	232,093	647,786	1275,9	80,779	277,640	71,279	19,092	385,193	0,2187	1,7859	136,5

Tablo 7.16 AISI 8620 Çeliği İçin Akma Gerilimi, Tane Boyutu ve MATLAB Hesaplamaları Sonucu Elde Edilen Kırılma Tokluğu Değerleri.

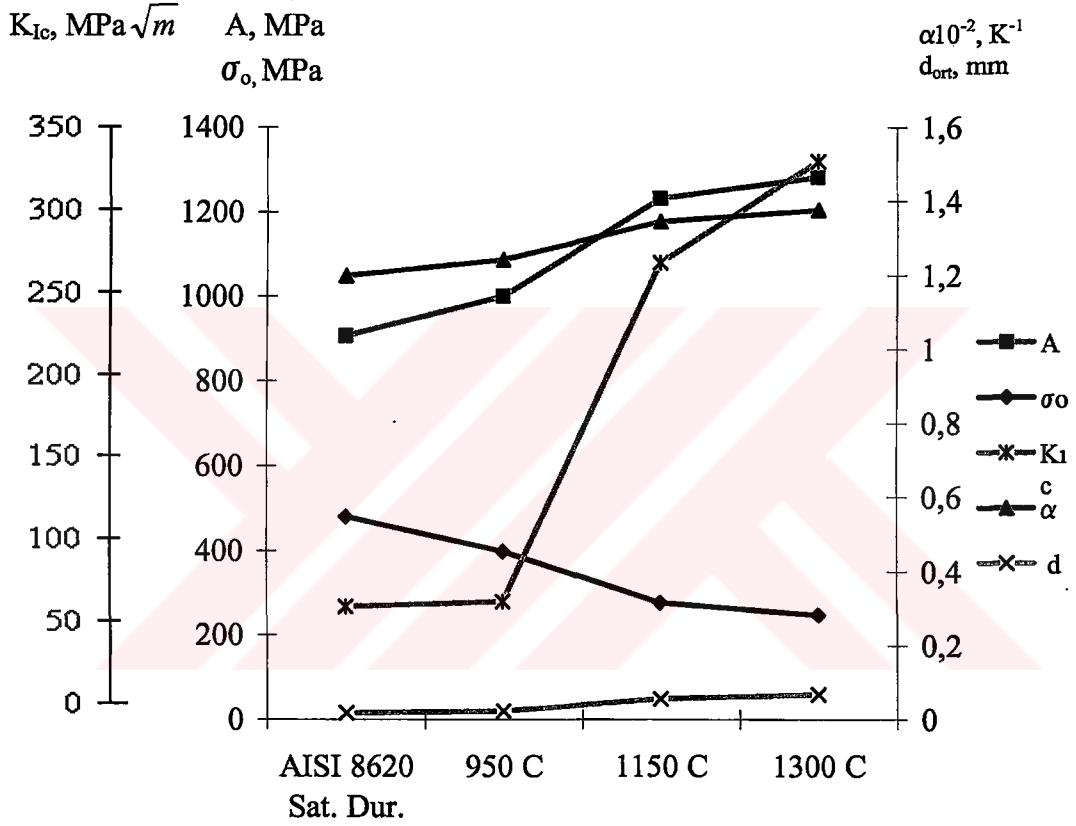
Malzeme ve Tam Tavlama Sıcaklığı	Kırılma Tokluğu	Akma Gerilimi	Tane Boyutu
	$MPa\sqrt{m}$	MPa	mm
AISI 8620 Sat. Dur.	70,946	504,314	0,0170
950 C (1)	69,38	424,47	0,0219
950 C (2)	79,903	406,278	0,0240
950 C (3)	67,315	434,794	0,0238
1150 C (1)	282,343	298,84	0,0552
1150 C (2)	261,762	296,298	0,0542
1300 C (1)	308,244	288,153	0,0619
1300 C (2)	337,025	281,153	0,0681
1300 C (3)	385,193	250,829	0,0712



Şekil 7.17 AISI 8620 Çeliği için Akma Gerilimi, Kırılma Tokluğu ve Tane Boyutu İlişkisi.

Tablo 7.17 AISI 8620 Çeliği için MATLAB hesaplamaları sonucu elde edilen A, σ_o , K_{1c}, α ve tane boyutu "d" değerleri

Malzeme ve ısıtım işlem durumları	A	σ_o	K _{1c}	$\alpha 10^{-2}$	d _{ort}
	MPa	MPa	MPa \sqrt{m}	K ⁻¹	mm
AISI 8620 Sat. Dur.	906,506	480,112	70,946	1,2	0,0170
950 C	1001,162	398,432	72,199	1,243	0,0232
1150 C	1230,95	276,743	272,052	1,345	0,0547
1300 C	1282	248,022	343,487	1,3766	0,0671



Şekil 7.18 AISI 8620 için A, σ_o , K_{1c}, α ve Tane Boyutu "d" Arasındaki İlişki Grafiği.

7.1.3 AISI 1016 Çeliği İçin Deneysel Sonuçlar

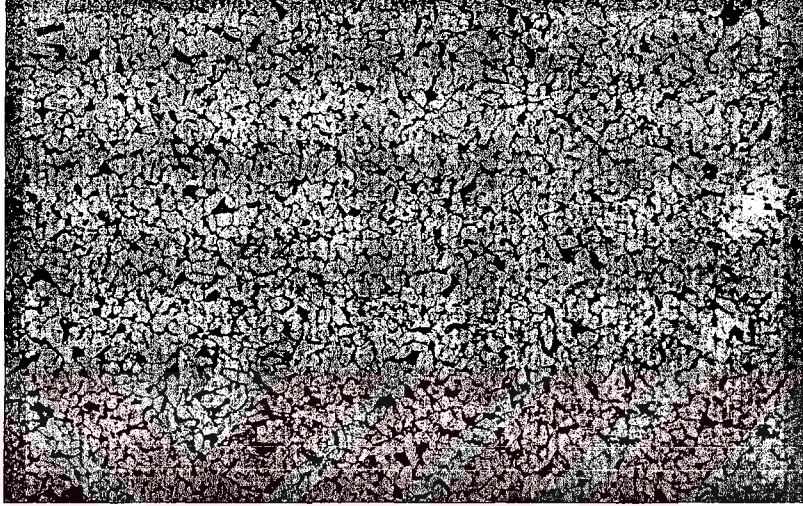
Tablo 6.3' deki bileşime sahip olan AISI 1016 çeliğinden çekme deney numuneleri hazırlanmıştır. Tablo 6.6' da gösterilmiş olan sıcaklıklarda tam tavlama ısıtım işlemleri yapılmıştır. Bu işlemler sonrası deney numuneleri çekme deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonucu elde edilmiş olan değerler Tablo 7.18' de gösterilmiştir.

Tablo 7.18 AISI 1016 Çeliği Deney Numunelerinin Ölçüleri ve Deney Sonuçları.

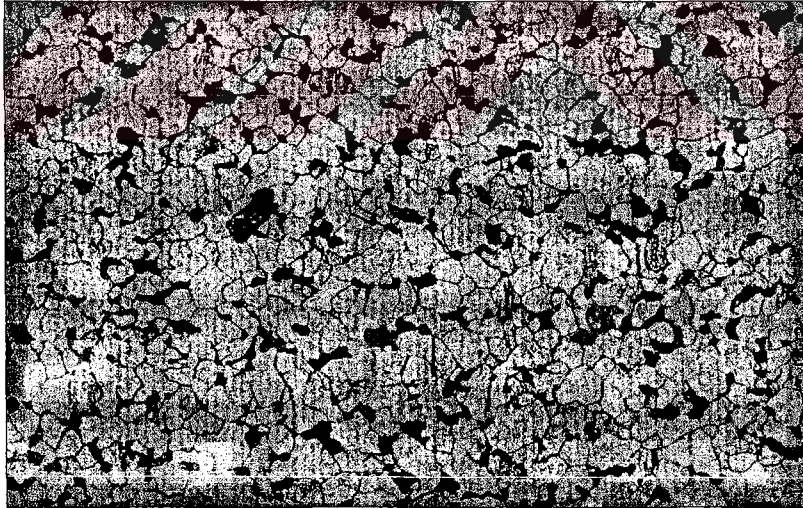
Malzeme ve Nosu	l ₀	d ₀	A ₀	P _a	P _ç	P _k	l _k	d _k	A _k	δ	ψ	σ		S _{kop}
												σ _y	σ _ç	
AISI 1016	mm	mm	mm ²		kg		mm	mm	mm ²	%		MPa		
0	61,45	4,9	18,847	688,05	1008,989	677,358	73,8	2,55	5,104	16,734	47,959	365,071	535,357	1327,112
1-1	58,65	4,9	18,847	631	894,866	616,352	72,4	2,6	5,306	23,444	46,938	335,038	474,805	1161,481
1-2	58,25	4,85	18,465	609,142	840,662	588,571	71,65	2,6	5,306	18,702	46,391	329,890	455,273	1109,255
1-3	57,2	5,1	20,417	660	940,250	653,333	72,55	2,8	6,154	21,157	45,098	323,260	460,523	1061,639
2-1	59,4	4,85	18,465	466,666	795,075	515,151	72,9	2,55	5,104	18,518	47,422	252,730	430,584	1009,308
2-2	59,4	4,95	19,234	453,333	808,826	546,666	74,3	2,55	5,104	20,055	48,484	235,693	420,518	1071,054
2-3	59,25	4,9	18,847	425,806	798,993	548,387	75	2,45	4,711	21	50	225,927	423,936	1164,056
3-1	60,2	4,55	16,251	417,391	624,998	382,608	73,3	2,35	4,335	17,871	48,351	240,327	384,590	882,602
3-2	61,25	4,7	17,340	388,888	650,877	389,534	74,15	2,4	4,521	17,397	48,936	224,272	375,361	861,610
3-3	60,55	4,95	18,847	417,140	755,593	424,760	75,4	2,55	5,104	19,694	48,484	221,330	400,908	832,211

AISI 1016 Çeliği İçin Ortalama Tane Boyutunun Belirlenmesi

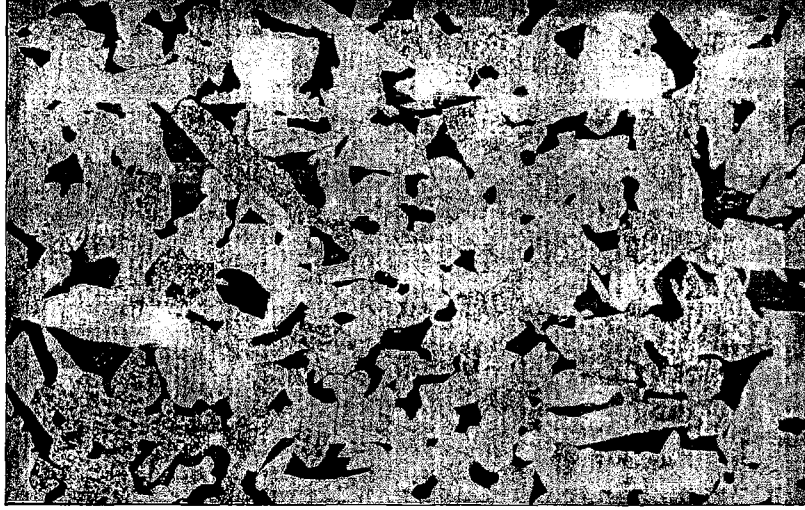
Tablo 6.6' da ki gösterilen ısıl işlem şartlarına göre deneyleri yapılan AISI 1016 çeliğinden hazırlanan çekme deneyi numunelerinden mikro yapı incelemesi ve tane boyutu hesaplamaları için optik mikroskop numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerden 100X büyütmede fotoğraflar çekilmiştir. AISI 1016 için mikro yapı fotoğrafları aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



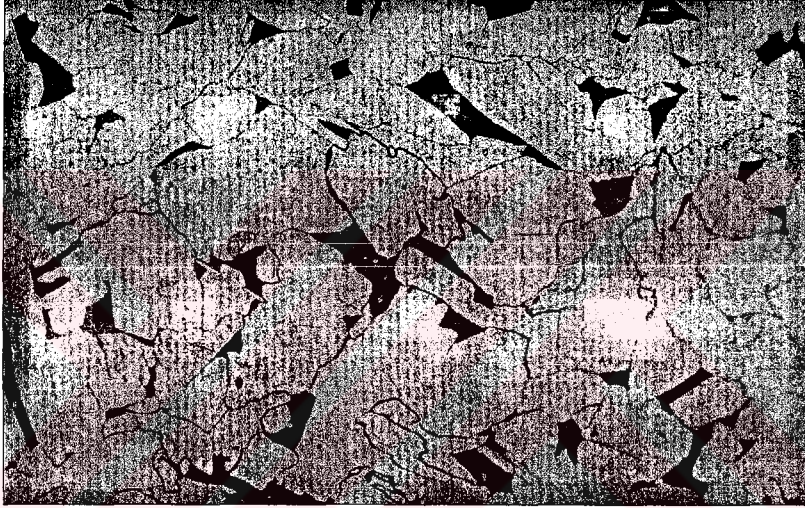
şekil 7.19 AISI 1016 Satıldığı Durumdaki Mikro Yapı Fotoğrafı (100X).



şekil 7.20 AISI 1016 eliğinin 950 °C' de 1 Saat Tam Tavlanmış Mikroyapı Fotoğrafı (100X).



Şekil 7.21 AISI 1016 Çeliğinin 1150 °C' de 1,5 Saat Tam Tavlanmış Mikroyapı Fotoğrafi (100X).



Şekil 7.22 AISI 1016 Çeliğinin 1300 °C' de 2,5 Saat Tam Tavlanmış Mikroyapı Fotoğrafi (100X).

Mikroyapı fotoğraflarına bakıldığında nispeten AISI 1030 ve AISI 8620 çeliklerine göre düşük karbon içeriğine sahip olan AISI 1016 çeliğinin içyapısı ağırlıklı olarak ferritten oluşmuştur. Ferrit taneleri arasında perlit taneleri homojen olarak dağılmıştır.

Optik mikroskopta fotoğrafları çekilen AISI 1016 çeliği numunelerinin formül (6.20)' e göre tane boyutu hesaplanmıştır. Akma gerilimi ve tane boyutu değerleri Tablo 7.19' da verilmiştir.

Tablo 7.19 AISI 1016 Çeliği İçin Isıl İşlem Çeşidi, Akma Gerilimi ve Tane Boyutu Değerleri.

Malzeme	Tavlama Sıcaklığı (°C)	Bekletme Süresi (Saat)	Soğutma Ortamı	Isıl İşlem Çeşidi	Akma Gerilimi (σ_y), MPa	Tane Boyutu (d. 10^{-3}), mm
AISI 1016	-	-	-	Satıldığı Durum	365,071	20,016
AISI 1016/ 1.1	950	1	Fırında Soğutma	Tam Tavlama	335,038	20,213
AISI 1016/ 1.2	950	1	Fırında Soğutma	Tam Tavlama	329,890	21,332
AISI 1016/ 1.3	950	1	Fırında Soğutma	Tam Tavlama	323,260	20,016
AISI 1016/ 2.1	1150	1,5	Fırında Soğutma	Tam Tavlama	252,730	54,557
AISI 1016/ 2.2	1150	1,5	Fırında Soğutma	Tam Tavlama	235,693	53,608
AISI 1016/ 2.3	1150	1,5	Fırında Soğutma	Tam Tavlama	225,927	56,559
AISI 1016/ 3.1	1300	2,5	Fırında Soğutma	Tam Tavlama	240,327	71,860
AISI 1016/ 3.2	1300	2,5	Fırında Soğutma	Tam Tavlama	224,272	76,111
AISI 1016/ 3.3	1300	2,5	Fırında Soğutma	Tam Tavlama	221,330	75,182

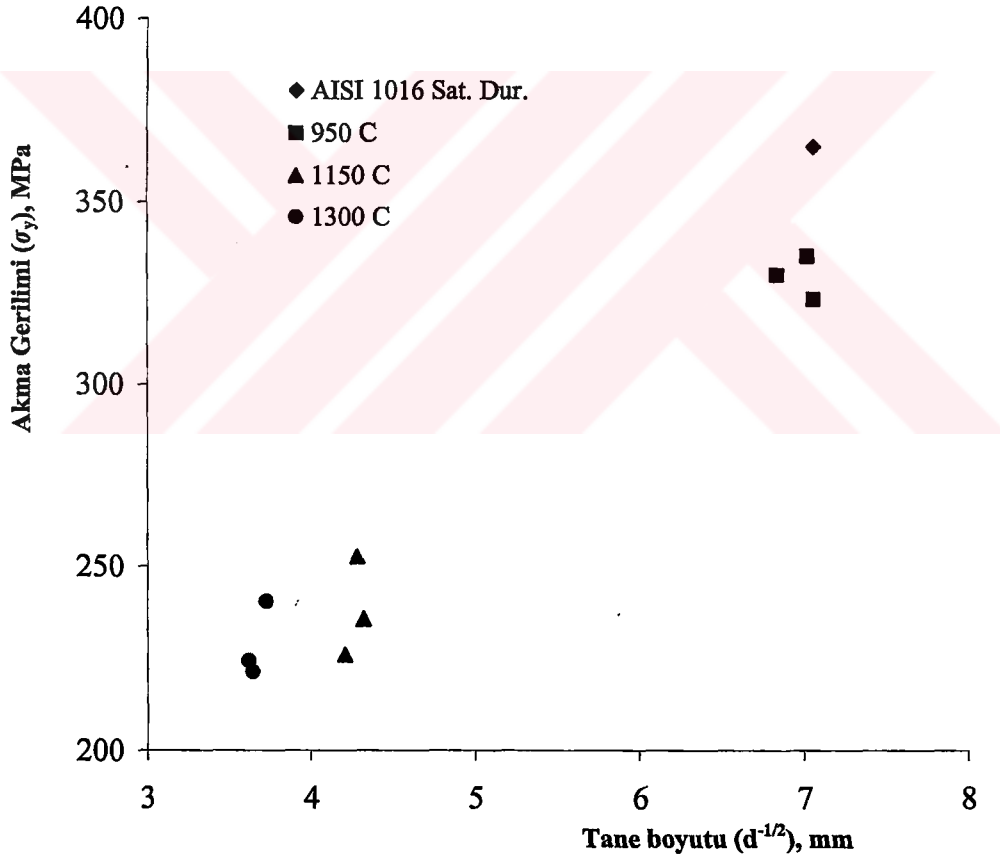
Tablo 7.19' da akma gerilimi ve tane boyutu değerlerine bakıldığında AISI 1016 çeliği nispeten AISI 1030 ve AISI 8620 çeliklerine göre daha düşük tane boyutu ve akma gerilimi değerleri vermiştir. AISI 8620 çeliğine göre ise ortalama tane boyutu yaklaşık olarak aynı iken akma gerilimi değerleri nispeten düşüktür.

Tablo 7.20' de AISI 8620 için değişik tam tavlama sıcaklıklarındaki tane boyutları ve akma gerilim değerleri verilmiştir. Şekil 7.23' de Tablo 7.20' ye uygun olarak akma gerilimi ve tane boyutu ilişkisi şematik olarak gösterilmiştir.

Formül (6.17), (6.18), (6.19), (6.20)' e göre AISI 1016 çeliği için elde edilmiş olan değerler Tablo 7.22 ' de verilmiştir. Değişik tane boyutlarındaki akma gerilimi değerleri arasındaki ilişki Şekil 7.25' de gösterilmiştir.

Tablo 7.20 AISI 1016 Çeliği için Uygulanan Sıcaklık Rejimleri, Tane Boyutu ve Akma Gerilimi Değerleri.

Malzeme ve Uygulanan Sıcaklık Rejimleri	Tane Boyutu ($d^{-1/2}$), mm	Akma Gerilimi (σ_y), MPa
AISI 1016 Sat.Dur.	7,068	365,071
950 C	7,033	335,038
950 C	6,846	329,89
950 C	7,068	323,26
1150 C	4,281	252,73
1150 C	4,319	235,693
1150 C	4,204	225,927
1300 C	3,73	240,327
1300 C	3,624	224,272
1300 C	3,647	221,33

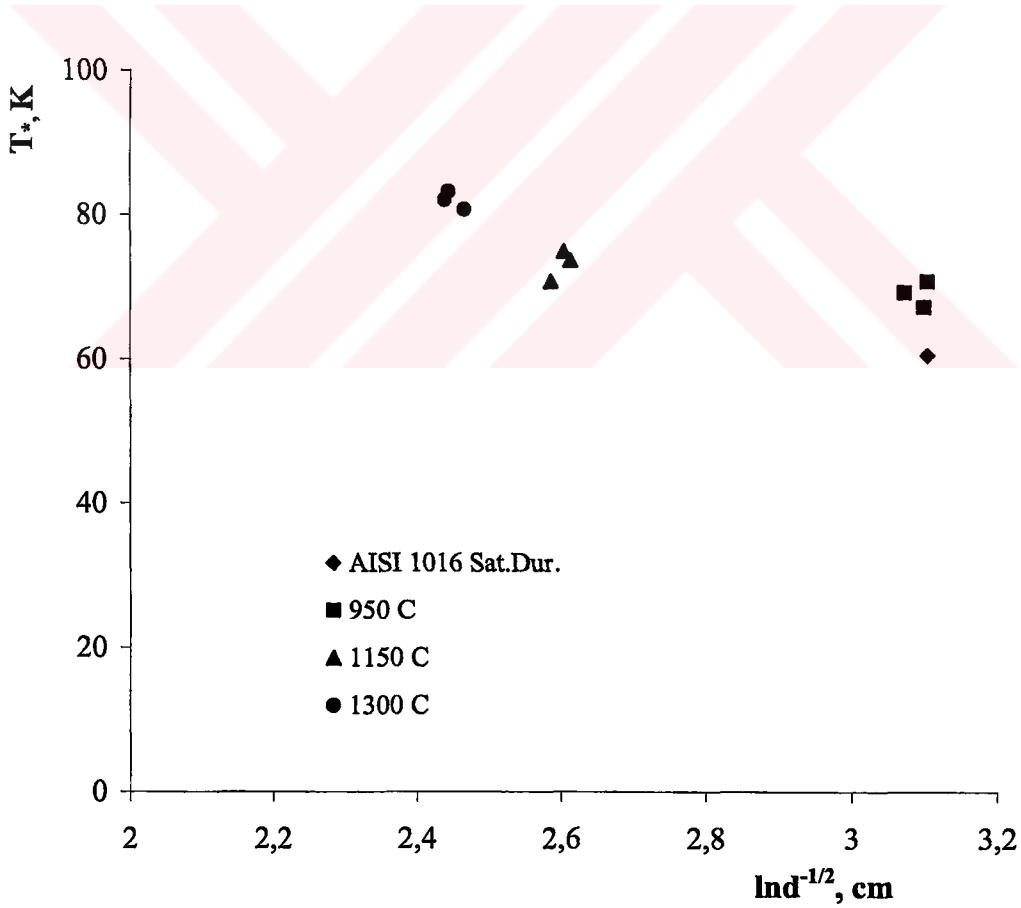


Şekil 7.23 AISI 1016 Çeliği için Akma Gerilimi ve Tane Boyutu İlişkisi.

AISI 1016 çeliği için T_* sıcaklıkları ve tane boyutu değerleri Tablo 7.21' de ve Tablo 7.21' de ki tane boyutu ve T_* değerleri dikkate alınarak çizilmiş olan grafik Şekil 7.24' de gösterilmiştir.

Tablo 7.21 AISI 1016 Çeliği İçin T_* ve Tane Boyutu ($\ln d^{-1/2}$) Değerleri.

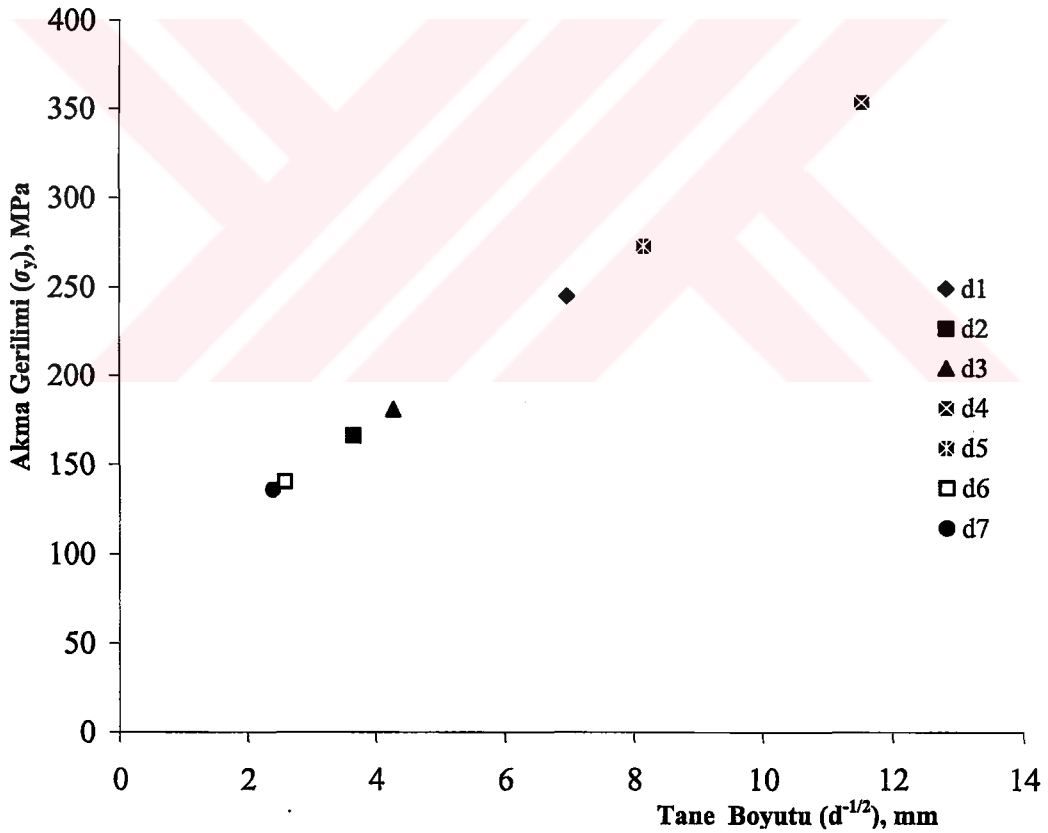
Malzeme ve No'su	$\ln d^{-1/2}, \text{cm}$	T_*, K
AISI 1016 Sat.Dur.	3,106	60,546
950 C	3,102	67,244
950 C	3,075	69,264
950 C	3,106	70,793
1150 C	2,605	74,967
1150 C	2,614	73,674
1150 C	2,587	70,779
1300 C	2,467	80,746
1300 C	2,439	82,092
1300 C	2,445	83,242



Şekil 7.24 AISI 1016 Çeliği İçin T_* ve $\ln d^{-1/2}$ Grafiği.

Tablo 7.22 AISI 1016 için Formül (6.18) ve (6.20)' e Göre Çeşitli Tane Boyutları (d) İçin Elde Edilmiş Olan σ_y Değerleri Tablosu.

AISI 1016 Çeliği için	σ_{y0}	σ_0	d_1	d_2	d	k	σ_{y1}	σ_{y2}	σ_y
	MPa		$d \cdot 10^{-3}, \text{ mm}$			$\text{MPa} \sqrt{m}$	MPa		
950 C	329,396	307,537	20,520	-	-	0,961	245,060	166,166	180,846
1300 C	228,643	210,770	-	74,384	-				
d3 (1100 C)	-	-	-	-	54,509		-	-	
d4	d4, d5, d6 ve d7 formül (6.20)' de "d" parametresi için rastgele alınmış ortalama tane boyutu değerleridir.				7,50		-	-	353,747
d5					15,0		-	-	273,747
d6					150,0		-	-	140,353
d7					175,0		-	-	135,794



Şekil 7.25 AISI 1016 için Çeşitli Tane Boyutları ile Akma Gerilimi Arasındaki İlişki.

AISI 1016 Çeliği İçin MATLAB Hesaplamaları

AISI 1016 eliği için MATLAB 6.5 programı ile hesaplanmış olan kırılma tokluk değerleri ve kırılma tokluğuna etki eden parametre değerleri Tablo 7.23' de gösterilmiştir.

Tablo 7.23' deki değerler dikkate alınarak AISI 1016 eliği için Şekil 7.26' da akma gerilimi, kırılma tokluğu ve tane boyutu arasındaki değişim grafiği gösterilmiştir. Şekil 7.26' daki akma gerilimi, kırılma tokluğu ve tane boyu değerleri Tablo 7.24' de verilmiştir.

Akma geriliminin azalması ve tane boyutunun artması ile kırılma tokluğunda artış görülmektedir. Bu durum AISI 1016 eliği için belirgin bir Şekilde Şekil 7.26' da görülebilmektedir.

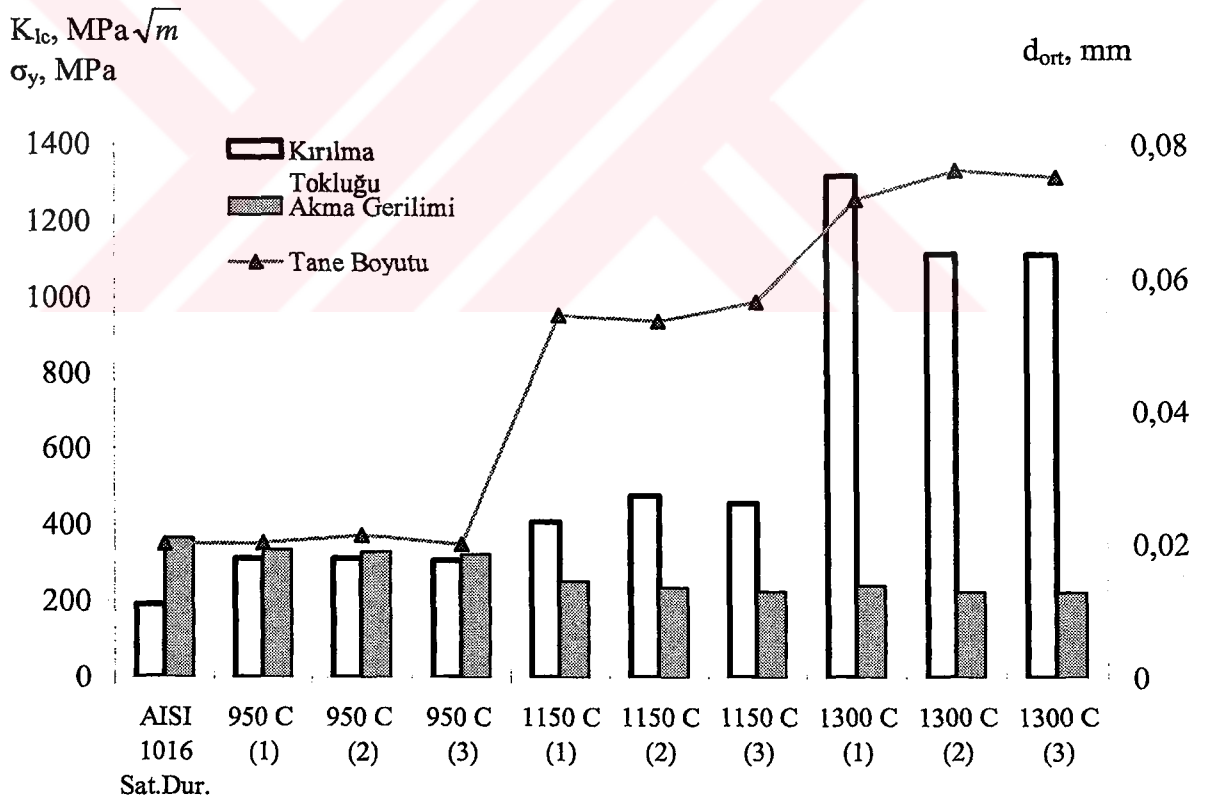
Tablo 7.27' deki kırılma tokluğuna etki eden A , σ_0 , K_{1c} , α ve tane boyutu "d" parametre değerlerinin kırılma tokluğuna etkisi Şekil 7.27' de gösterilmiştir.

Tablo 7.23 AISI 1016 Çeliği İçin MATLAB Programı İle Elde Edilen Sonuçlar.

Malzeme ve Uygulanan Isıl İşlem Rejimleri	$\alpha \times 10^{-2}$	σ_0	S_{fr}	A	T_*	T^*	d	K_{lc}^0	K_{Ic}	n	\mathcal{X}	β_y
	K ⁻¹		MPa		K		10 ⁻³ ,mm	MPa \sqrt{m}	MPa \sqrt{m}	-	-	K
AISI 1016 - Satıldığı durum	1,29	342,410	849,646	1104,8	60,546	293	20,016	8,7612	191,934	0,1512	2,8074	98,5
AISI 1016-950 °C/1saat Tam tavlama (1)	1,31	312,963	798,729	1174,3	67,244	293	20,213	9,3580	312,546	0,1507	2,8175	108,5
AISI 1016-950 °C/1saat Tam tavlama (2)	1,32	307,976	782,453	1181,2	69,264	293	21,332	9,6696	312,461	0,1541	2,7444	110
AISI 1016-950 °C/1saat Tam tavlama (3)	1,32	301,672	762,936	1173,9	70,793	293	20,016	9,3087	308,181	0,1546	2,7333	111
AISI 1016-1150 C/1,5saat Tam tavlama (1)	1,40	233,652	702,021	1334,4	74,967	239,359	54,557	17,4691	408,667	0,2323	1,6524	139,5
AISI 1016-1150 C/1,5saat Tam tavlama (2)	1,42	217,353	707,046	1396,4	73,674	215,157	53,608	18,1214	478,041	0,2494	1,5050	149
AISI 1016-1150 C/1,5saat Tam tavlama (3)	1,43	208,144	717,087	1403,5	70,779	201,042	56,559	18,7078	458,187	0,2657	1,3821	153
AISI 1016-1300 °C/2,5saat Tam tavlama (1)	1,41	221,854	656,007	1357,1	80,746	248,714	71,860	20,3899	1318,7	0,1884	2,1539	148
AISI 1016-1300 °C/2,5saat Tam tavlama (2)	1,43	206,595	638,246	1401,4	82,092	234,196	76,111	21,6698	1116,1	0,2127	1,8503	153,5
AISI 1016-1300 °C/2,5saat Tam tavlama (3)	1,44	203,861	624,875	1391,1	83,242	237,306	75,182	21,379	1113,9	0,2114	1,8651	154

Tablo 7.24 AISI 1016 Çeliği İçin Akma Gerilimi, Tane Boyutu ve MATLAB Hesaplamaları Sonucu Elde Edilen Kırılma Tokluğu Değerleri.

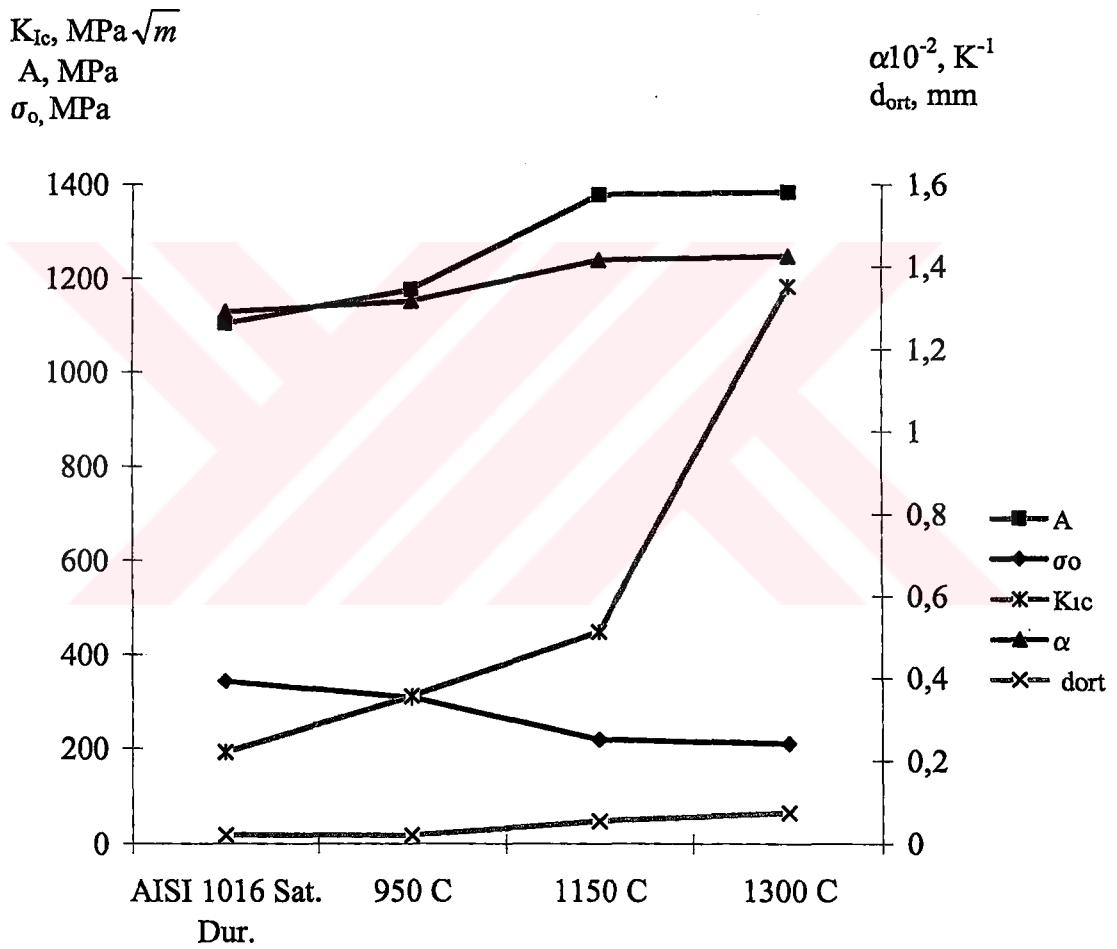
Malzeme ve ısıt işlemleri rejimleri	Kırılma Tokluğu	Akma Gerilimi	Tane Boyutu
	$MPa\sqrt{m}$	MPa	mm
AISI 1016 Sat.Dur.	191,934	365,071	0,020016
950 C	312,546	335,038	0,020213
950 C	312,461	329,89	0,021332
950 C	308,181	323,26	0,020016
1150 C	408,667	252,73	0,054557
1150 C	478,041	235,693	0,053608
1150 C	458,187	225,927	0,056559
1300 C	1318,7	240,327	0,071860
1300 C	1116,1	224,272	0,076111
1300 C	1113,9	221,33	0,075182



Şekil 7.26 AISI 1016 Çeliği için Akma Gerilimi, Kırılma Tokluğu ve Tane Boyutu İlişkisi.

Tablo 7.25 AISI 1016 Çeliği İçin MATLAB Hesaplamaları Sonucu Elde Edilen A, σ_o , K_{Ic} , α ve Tane Boyutu "d" değerleri

Malzeme ve ısı işlem durumları	A	σ_o	K_{Ic}	$\alpha 10^{-2}$	d_{ort}
	MPa	MPa	$MPa\sqrt{m}$	K^{-1}	mm
AISI 1016 Sat. Dur.	1104,8	342,41	191,934	1,29	0,020
950 C	1176,467	307,537	311,062	1,316	0,0205
1150 C	1378,1	219,716	448,298	1,416	0,0549
1300 C	1383,2	210,77	1182,9	1,426	0,0743



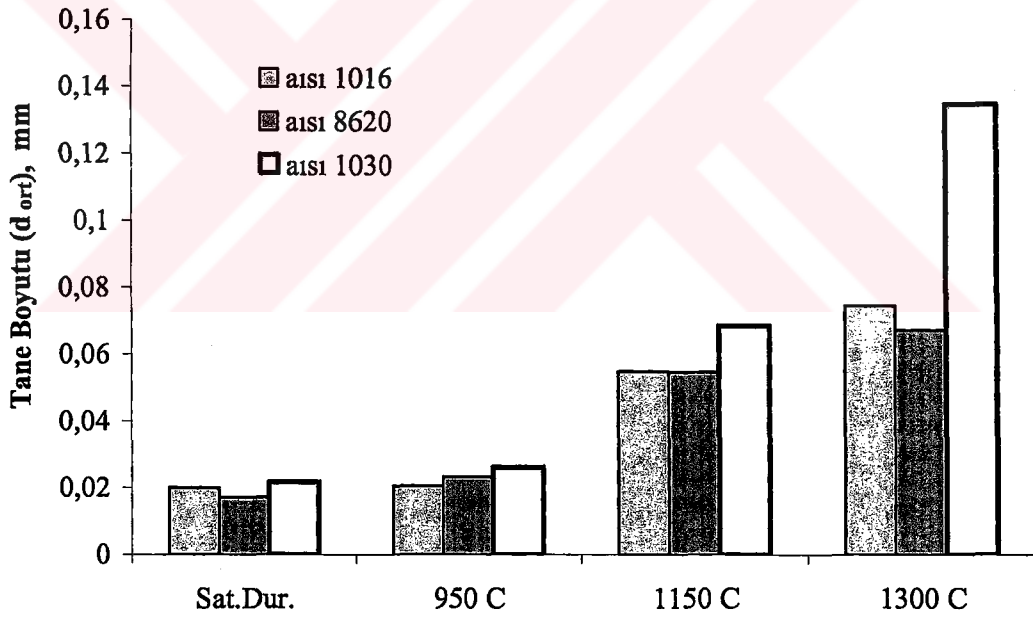
Şekil 7.27 AISI 1016 İçin A, σ_o , K_{Ic} , α ve Tane Boyutu "d" Arasındaki İlişki Grafiği.

7.1.4 AISI 1030, AISI 8620 ve AISI 1016 Çelikleri İçin Sonuçların Karşılaştırılması

AISI 1030, AISI 8620 ve AISI 1016 çelikleri için tam tavlama sıcaklıklarına bağlı olarak değişen tane boyutu değerleri Tablo 7.26’ da verilmiştir. Tane boyutlarındaki değişim Şekil 7.28’ de şematik olarak gösterilmiştir.

Tablo 7.26 AISI 1030, AISI 8620 ve AISI 1016 Çelikleri İçin Tam Tavlama Sıcaklıkları ve Ortalama Tane Boyutu Değerleri.

Tam Tavlama Sıcaklığı	AISI 1016	AISI 8620	AISI 1030
	d, mm	d, mm	d, mm
Sat.Dur.	0,020016	0,017075	0,021717
950 C AISI 1030 (900 C)	0,0205203	0,023287	0,026052
1150 C AISI 1030 (1100 C)	0,054908	0,054736	0,068478
1300 C	0,074384	0,067103	0,134695



Şekil 7.28 AISI 1030, AISI 8620 ve AISI 1016 Çelikleri İçin Tam Tavlama Sıcaklıklarına Bağlı Olarak Tane Boyutundaki Değişim Grafiği.

AISI 1030, AISI 8620 ve AISI 1016 çelikleri için kırılma tokluğu ve kırılma tokluğuna etki eden parametrelerin değerleri her bir tam tavlama sıcaklığı için Tablo 7.27’ de verilmiştir.

Tablo 7.27 AISI 1030, AISI 8620 ve AISI 1016 Çelikleri İçin Çeşitli Değerlerin Karşılaştırılması.

Malzeme ve Uygulanan Isıl İşlem Rejimleri	$\alpha \times 10^2$	σ_{y0}	σ_0	S_{fr}	A	T*	d	K_{lc}^0	K_{Ic}	χ	n
	K^{-1}	MPa									
AISI 1030 - Satıldığı durum	1,20	511,359	487,363	932,435	883,947	57,261	24,717	7,789	20,373	1,7719	0,2201
AISI 8620 - Satıldığı durum	1,20	504,314	480,112	939,531	906,911	56,500	17,075	6,642	70,946	4,069	0,1094
AISI 1016 - Satıldığı durum	1,29	365,071	342,410	849,646	1104,8	60,546	20,016	8,7612	191,9342	2,8074	0,1512
AISI 1030-900 °C /1 saat Tam tavlama	1,213	484,776	460,695	876,608	928,848	66,460	21,717	8,4026	28,046	1,869	0,2112
AISI 8620 -950 °C /1 saat Tam tavlama	1,243	421,847	398,432	869,154	1001,162	60,629	23,287	8,563	72,199	2,470	0,1676
AISI 1016-950 °C /1 saat Tam tavlama	1,316	329,396	307,537	781,372	1176,467	69,100	20,520	9,445	311,062	2,765	0,1531
AISI 1030-1100 °C /1,5 saat Tam tavlama	1,28	379,822	356,695	777,914	1100,267	75,119	25,952	16,1286	84,502	1,561	0,2426
AISI 8620 -1150 °C /1,5 saat Tam tavlama	1,345	297,569	276,743	769,386	1230,95	68,079	54,736	16,141	272,0582	1,902	0,2081
AISI 1016-1150 °C /1 saat Tam tavlama	1,416	238,104	219,716	708,718	1378,1	73,14	54,509	18,099	448,298	1,513	0,2491
AISI 1030-1300 °C /2,5 saat Tam tavlama	1,283	365,267	342,381	785,605	1130,4	72,602	134,695	23,2412	127,545	1,512	0,2485
AISI 8620-1300 °C /2,5 saat Tam tavlama	1,376	267,652	248,022	660,385	1282	82,506	67,103	18,607	343,487	1,846	0,2131
AISI 1016-1300 °C /2,5 saat Tam tavlama	1,426	228,643	210,77	639,703	1383,2	82,026	74,384	21,146	1182,9	1,956	0,2041

7.2 TARTIŞMA

Karbon dışında alaşım elementi içermeyen AISI 1030 çeliğinin tam tavlama işlemi sonrası tane boyutu AISI 8620 ve AISI 1016 çeliklerine göre belirgin bir şekilde artmıştır. Karbon miktarının yüksek, alaşım elementi miktarının düşük olması ile tam tavlama sıcaklığı ve bekletme süresindeki artış difüzyon işleminin daha aktif bir şekilde gerçekleşmesini sağlamıştır. Difüzyon işlemi şiddetinin artması tane boyutunu arttırmıştır. AISI 1016 çeliği ise AISI 8620 çeliği ile yaklaşık aynı tane boyutu sergilemiştir. AISI 8620 çeliğinin karbon miktarı AISI 1016 çeliğine göre yüksek olmasına rağmen bünyesinde bulundurduğu alaşım elementleri tane boyutu artmasına engel olmuştur. İncelemeye tabi tutulan çeliklerde tane boyutunun artması mekanik özelliklerde (akma gerilimi, maksimum çekme gerilimleri) azalmaya neden olmuştur.

Çeliklerin kırılma tokluğu (K_{Ic}), tane boyutunun artması ile artmıştır. Kırılma tokluğundaki artış; numune içerisinde var olan veya daha sonra meydana gelen mikro çatlakların dış kuvvet etkisinde ana çatlak ile birleşmesi için taneleri geçerek ilerlemesi gerekir. Tane boyutu arttıkça çatlakların ilerlemesi için gereken mesafe de artmaktadır. Tane boyutunun büyümesi çeliklerin kırılma tokluğunu arttırmıştır.

AISI 1016 çeliğinin bileşiminde karbon miktarının düşük olması, tam tavlama işlemi sonrasında ferritik bir iç yapı oluşumunu sağlamıştır. Ferit ağırlıklı iç yapıya sahip AISI 1016 çeliğinin kırılma tokluğu AISI 1030 ve AISI 8620 çeliklerine göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak kırılma tokluğunu etkileyen A , σ_o , K_{Ic}^0 , α ve n gibi parametrelerin tane boyutu ile ilişkide olduğu tespit edilmiştir.

REFERANSLAR

Akseland D.R., Çeviri: Erdoğan M., 1998, “Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri”, Nobel Yayın Dağıtım, 3. Baskı, Ankara.

Annual Book of ASTM Standards, 2003, Volume 03.01, pp 451-482.

Aytekin H., 2004, “Yapı Çeliklerinin Kırılma Tokluğu Üzerine Bir Çalışma”, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.

Broek, D., 1974, “Elementary Engineering Fracture Mechanics”, Leyden:Noordhoft int. Publ. pp 530.

Bucak A., 2000, “Isıl İşleme Tabi Tutulan SAE 8620 Çeliğinin Yapı ve Mekanik Özelliklerindeki Değişimlerin İncelenmesi”, Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Afyon. S 8-16.

Çiğdemoğlu M., 1972, “Metal ve Alaşımlarının Isıl İşlemleri”, MMO Yayınları, Ankara, S 110.

Esen E., 2000, “Karbonlu Çeliklerin Isıl İşlem Etkisinde Sertleşme Kabiliyeti”, Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Afyon, S 3.

Horoz M., 1993, “Kırılma Mekaniğinde Parça Oryantasyonu ve Tane Boyutunun Kırılma Tokluğuna Etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.

http://isis.hut.fi/opinto_sivut/Lisat/119/2005/E399.PDF 21.04.2005

<http://matse101.mse.uiuc.edu/pdf/Materials%20Selection%20pt%20II.pdf>
(16.02.2005)

<http://web.utk.edu/~prack/MSE%20300/FeC.pdf> (22.10.2004)

http://www.ccm.udel.edu/Personnel/homepage/class_web/Lecture%20Notes/2004/AskelandPhuleNotes-CH12Printable.ppt (24.12.2004)

<http://www.celikticaret.com/alelementler.htm> (27.12.2004)

http://www.cemtas.com.tr/yeni/celik_hakkinda.htm (03.11.2004)

http://www.cemtas.com.tr/yeni/fason_isl3.htm (12.11.2004)

http://www.cmsmakina.com/kou/projeler/pdf/odev_civi_imalati.pdf (30.01.2005)

<http://www.egr.uh.edu/me/ceramics/3445LabManual/8.HEATTREATMENT.pdf>
(17.11.2004)

http://www.gencbilim.com/odev/gencbilim_makine_000068.html (25.12.2004)

<http://www.koumakina2001.8m.com> (19.11.2004)

http://www.kutuphanem.net/goruntule.asp?islem=goruntule&dok_no=6559
(15.12.2004)

http://www.odevsitesi.com/default.asp?islem=dok_indir&odevno=3622
(24.12.2004)

<http://www.tu-darmstadt.de/fb/ms/student/fs/german/lab/w4/mse4-2.htm>
(12.02.2005)

http://www.twi.co.uk/j32k/protected/band_3/kscsw005.html (28.02.2005)

<http://www.yildirimdemircelik.com/yolcu4.htm> (27.12.2004)

Kayalı Y., 2004, “İsdemirde Üretilen Çeliklerin Temel Mekanik Özelliklerine Çeşitli Isıl İşlem Rejimlerinin Etkisi (Ç4140)”, Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Afyon, S 19-22.

Kopelman, L. A., 1978, “The Resistance Against Brittle Fracture in Welded Sections”, Moskova.

- KOSGEB, 1989, “Çelik Malzemelerin Seçimi ve Standartları”, İstanbul, S 9-29.
- Lawn, B. R., Wilshaw, T. R., 1975, “Fracture of Brittle Solids”, pp. 73-107.
- Lawrence H. Van Vlack, 1994, “Elements of Materials Science and Engineering”,
Literatür Yayıncılık, İstanbul. pp 271.
- Liebowitz, H., 1969, “Fracture, Volume IV Engineering Fracture Design”, pp. 40-70
- Makhutov N. A., (1973), “Resistanca of Constructional Components Against Brittle Fracture”, Machinostronie Moskova.
- Makine ve Kimya Endüstrisi Kurumu., 1978, “Çelik Türleri Katalogu”, MKE Basım Evi, Ankara.
- Onaran K., 1993, “Malzeme Bilimi”, Bilim Teknik Yayınevi, 4. Baskı, Eskişehir.
- Sadak M., 2000, “Isıl işleme tabi tutulan 42CrMo4 Çeliğinin Yapı ve Mekanik Özelliklerindeki Değişmelerin İncelenmesi”, Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Afyon, S 1-30.
- Said G., 2003, “Isıl İşlemler Dersi Ders Notları”, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Afyon.
- Said G., Taşgetiren S., 2000, “Fracture Toughness Determination of Low-Alloy Steels by Thermoactivation Energy Method”, Engineering Fracture Mechanics, May, Vol. 67, pp. 345-356.
- Saidov G. İ., (1989), “The Fracture Toughness of Low And Medium Strength Steels”., Taşkent.
- Serfiçeli Y. S., 2000, “Malzeme bilgisi”, Ankara, S 138-139.
- Smith F.W., 2001, “Malzeme Bilimi ve Mühendisliği” , Literatür Yayıncılık, İstanbul.

- Smith W.F., Çeviri: Erdoğan M., 2000, “Mühendislik Alaşımalarının Yapı ve Özellikleri”, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, S 68-71.
- Şişman A., 1999, “Isıl İşleme Tabii Tutulan Çeliğin Yapı ve Mekanik Özelliklerindeki Değişmelerin İncelenmesi”, Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Afyon, S 10.
- Topbaş M. A., 1998, “ Çelik ve Isıl İşlem El Kitabı”, Prestij Yayın Basım, İstanbul, S 33.
- Ulu S., 2004, “Karbonlu ve Düşük Alaşımli Çeliklerin Temel Mekanik Özelliklerinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Weissbach W., Çeviri: Anık S., Anık E. S., Vural M., 1998, “Malzeme Bilgisi ve Muayenesi”, Birsen Yayınevi, İstanbul, S 28-29, 58, 113.
- Yarashevich, V.D. and Rivkina, D. G. (1970), The Thermoactivation Character of Plastically Deformation of Metals, Russian Solid State Physics,
- Yüksel M., 2001, “Malzeme Bilgisi”, Makine Mühendisleri Odası yayını, Ankara, S 258-260, 262-265.

TEŞEKKÜR

Tez çalıőmam sũresince benden bilgi ve deneyimlerini hiçbir zaman esirgemeyen tez danıőmanım ve değerli hocam Prof. Dr. Galip SAİD' e sonsuz teőekkũrlerimi sunarım.

Tez çalıőmamda bulunduğu katkılardan dolayı sayın Yrd. Doç. Dr. Őũkrũ TALAŞ' a, Őęr. Grv. Fatih ÇOLAK' a, ArŐ. Grv. İsmail UCUN' a ve tũm bũlũm hocalarıma teőekkũrlerimi bir borç bilirim.

Teőekkũrlerin en bũyũęũnũ ise; tũm Őęrenim hayatım boyunca bir gũnũmde değil her gũnũmde, kelimelerle anlatılamayacak fedakarlık ve karŐılıksız sevgilerini benden esirgemeyen Dũnyadaki en bũyũk Őansım sevgili aileme sunarım.



ÖZGEÇMİŞ

21.12.1979 yılında Hatay' ın İskenderun ilçesinde doğan Rıza KARA, ilköğrenimini Çınarlı Köyü İlkokulu ve Namık Kemal Ortaokulunda tamamladı. Ortaöğrenimini İskenderun Endüstri Meslek Lisesi, Metal İşleri Bölümünde tamamladı. 1999 yılında başladığı Lisans Eğitimini Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümünde 2003 yılında tamamladı. Aynı yıl Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalında Lisansüstü Eğitimine başladı ve 2005 yılında Yüksek Lisansı' nı tamamladı. Halen Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümünde araştırma görevlisi olarak çalışmalarına devam etmektedir.



EKLER

1. AISI 1030 Satıldığı Durum

S_{kop} (kopma ger.).....:1292.622
 σ_{y0} (akma ger.).....:511.359
 β_y:66
 d_{ort}:24.717
 P_i Birinci Gerilim.....:636.802
 P_i Beşinci Gerilim.....:854.493
 Δ:0.843
 l_0:59.75

$$n = 0.2201$$

$$\sigma_0 = 487.3630$$

$$\alpha = 0.0120$$

$$A_{ort} = 883.9471$$

$$T^* = 57.2612$$

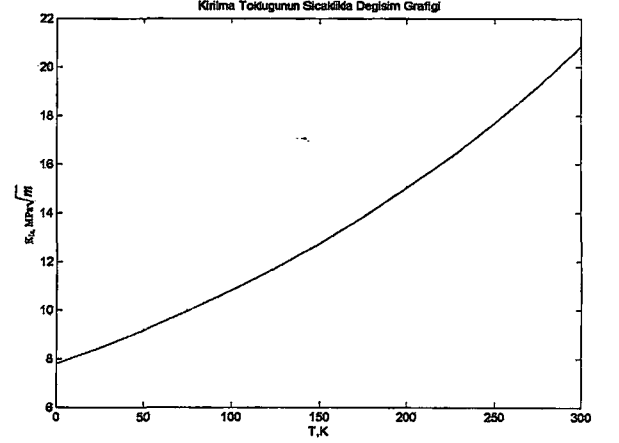
$$S_{fr} = 932.4357$$

$$T^* = 293.0000$$

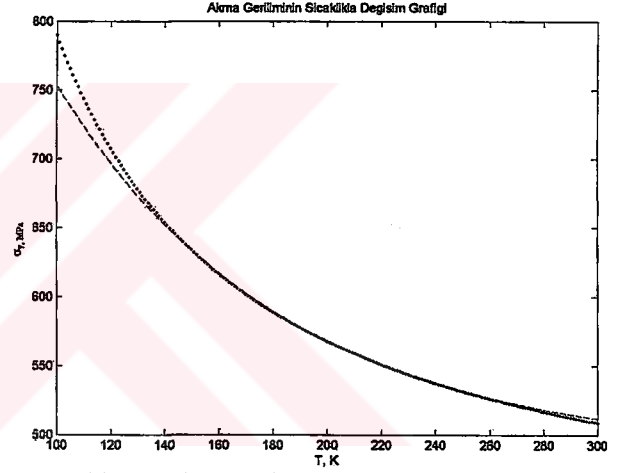
$$K_{1c}^0 = 7.7893$$

$$\kappa = 1.17719$$

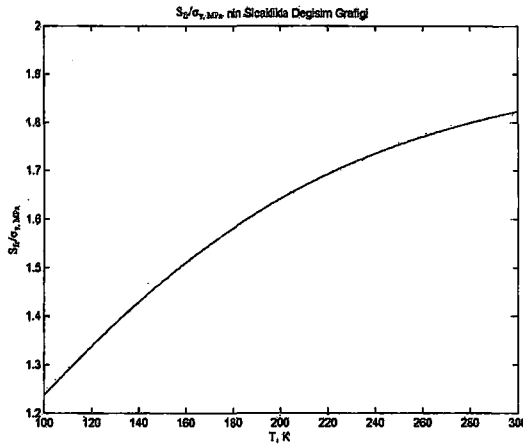
$$K_{1c} = 20.3736$$



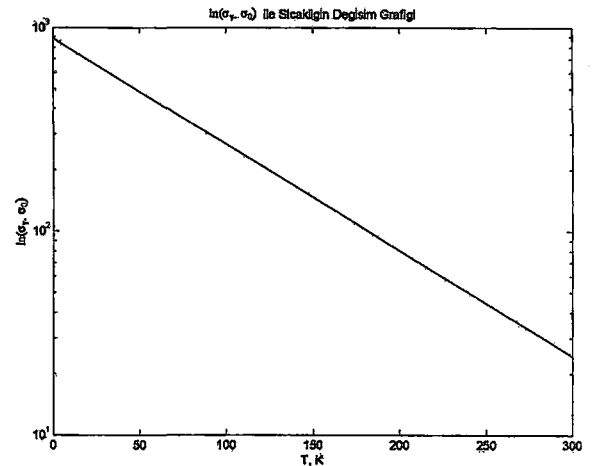
Şekil 1.2 Kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 1.3 Akma geriliminin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 1.1 S_{fr}/σ_y 'nin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 1.4 $\ln(\sigma_y - \sigma_0)$ ile sıcaklığın değişim grafiği

2. AISI 1030 900 C/1 Saat Tam Tavlama (1)

S_{kop} (kopma ger.).....:994.156
 σ_{y0} (akma ger.).....:489.987
 β_y:70
 d_{ort}:25.756
 P_i Birinci Gerilim.....:605.632
 P_i Beşinci Gerilim.....:819.245
 Δ:0.531
 l_0:59.65

$$n = 0.2116$$

$$\sigma_0 = 465.9608$$

$$\alpha = 0.0121$$

$$A_{ort} = 915.8935$$

$$T^* = 73.9627$$

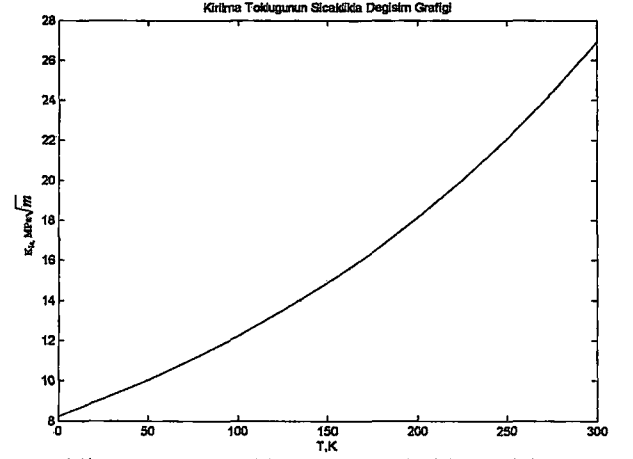
$$S_{fr} = 840.4859$$

$$T^* = 293$$

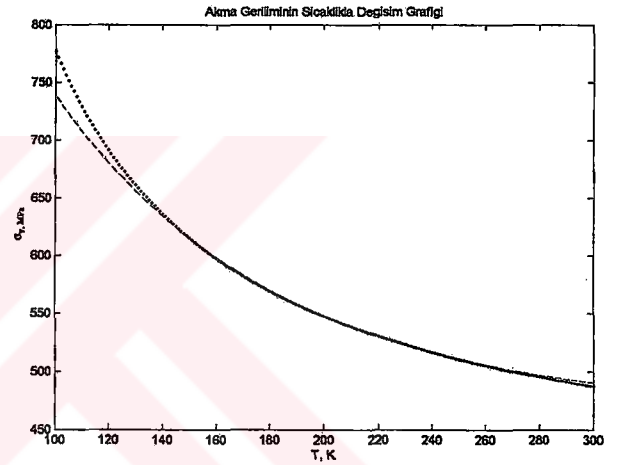
$$K_{Ic}^0 = 8.2387$$

$$\kappa = 1.8635$$

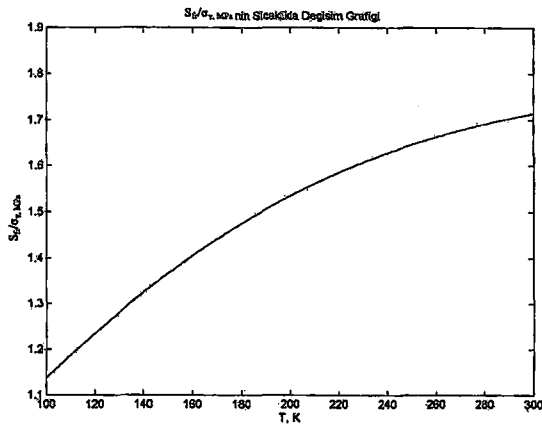
$$K_{Ic} = 26.1822$$



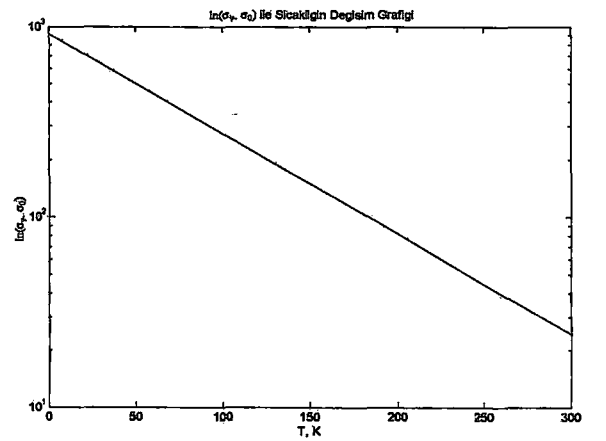
Şekil 2.2 Kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 2.3 Akma geriliminin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 2.1 S_{fr}/σ_y 'nin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 2.4 $\ln(\sigma_y - \sigma_0)$ ile sıcaklığın değişim grafiği

3. AISI 1030 900 C/1 Saat Tam Tavlama (2)

S_{kop} (kopma ger.).....:1180.671
 σ_{y0} (akma ger.).....:496.751
 β_y:69
 d_{ort}:25.864
 P_i Birinci Gerilim.....:662.383
 P_i Beşinci Gerilim.....:873.657
 Δ:0.712
 l_0:60.15

$$n = 0.2033$$

$$\sigma_0 = 472.6516$$

$$\alpha = 0.0121$$

$$A_{ort} = 910.8467$$

$$T^* = 62.6564$$

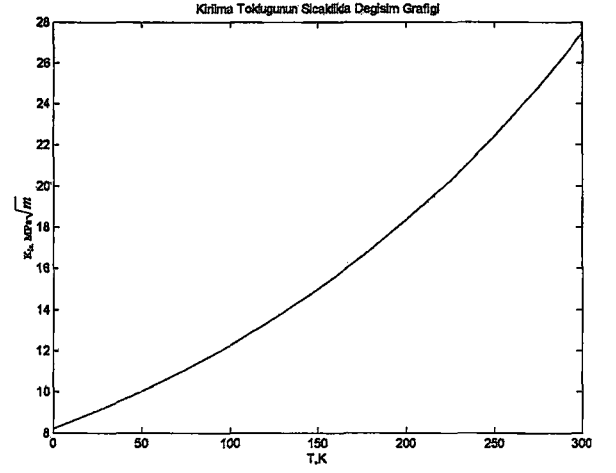
$$S_{fr} = 900.3913$$

$$T^* = 293.0000$$

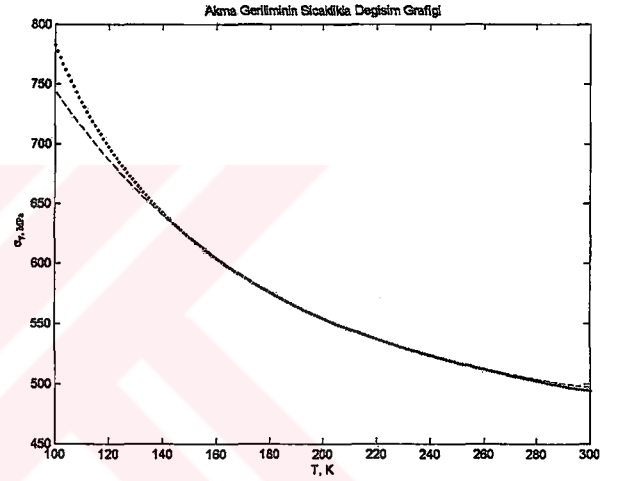
$$K_{Ic}^0 = 8.2105$$

$$\kappa = 1.9590$$

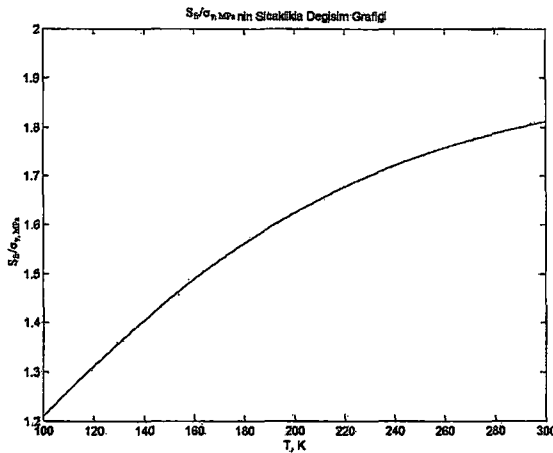
$$K_{Ic} = 26.6667$$



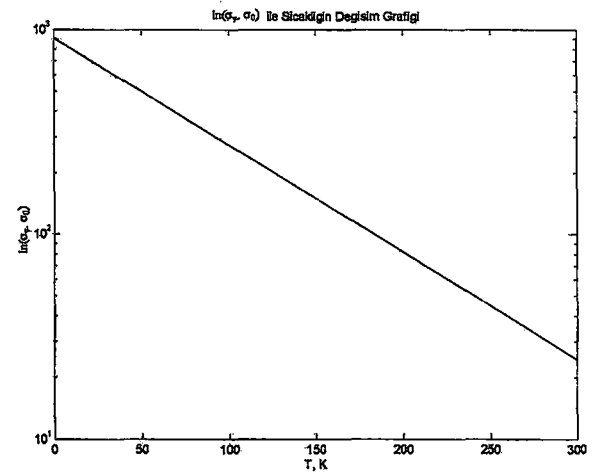
Şekil 3.2 Kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişim grafiği.



Şekil 3.3 Akma geriliminin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 3.1 S_{fr}/σ_y ' nin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 3.4 $\ln(\sigma_y - \sigma_0)$ ile sıcaklığın değişim grafiği

4. AISI 1030 900 C/1 Saat Tam Tavlama (3)

S_{kop} (kopma ger.).....:1195,800
 σ_{y0} (akma ger.).....:467,590
 β_y:75
 d_{ort}:26,536
 P_i Birinci Gerilim.....:619.070
 P_i Beşinci Gerilim.....:834.797
 Δ:0.750
 l_0:60.3

$$n = 0.2188$$

$$\sigma_0 = 443,476$$

$$\alpha = 0.0122$$

$$A_{ort} = 959,5065$$

$$T^* = 62,7641$$

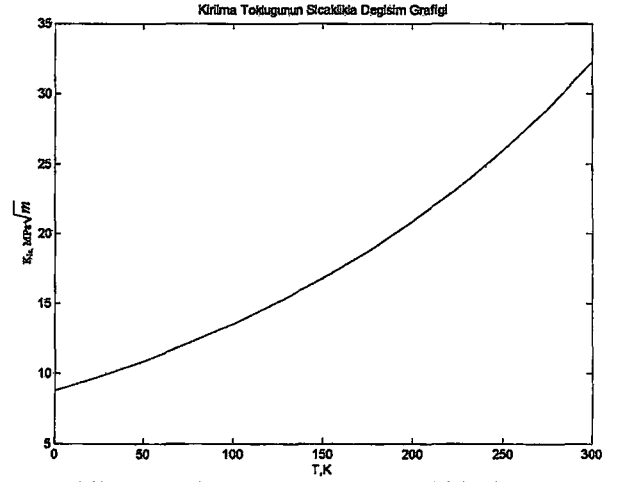
$$S_{fr} = 888,9506$$

$$T^* = 293.000$$

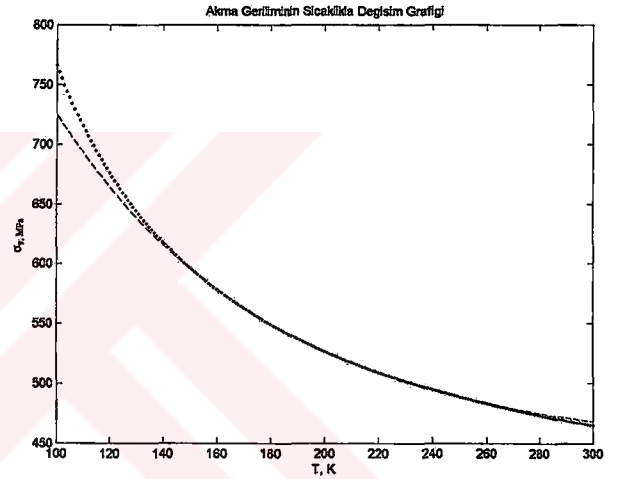
$$K_{1c}^0 = 8,7607$$

$$\kappa = 1.7847$$

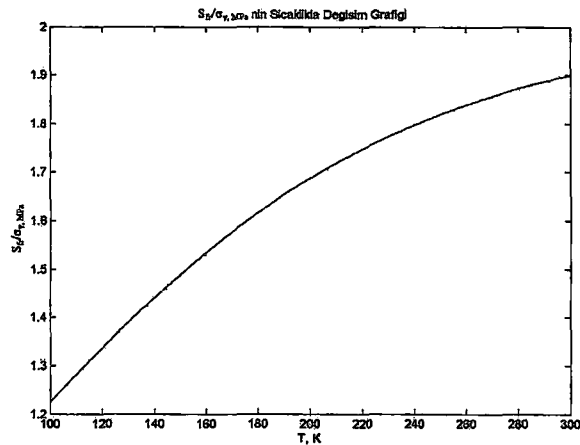
$$K_{1c} = 31.2910$$



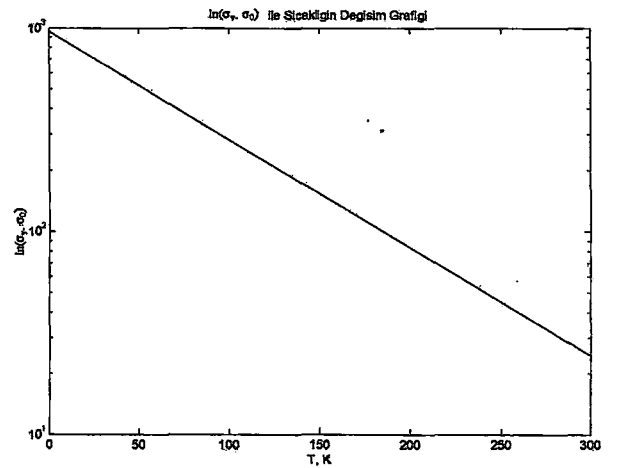
Şekil 4.2 Kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 4.3 Akma geriliminin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 4.1 S_{fr}/σ_y^* nin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 4.4 $\ln(\sigma_y - \sigma_0)$ ile sıcaklığın değişim grafiği

5. AISI 1030 1100 C/1,5 Saat Tam Tavlama (1)

S_{kop} (kopma ger.).....:954,366
 σ_{y0} (akma ger.).....:380,215
 β_y:95
 d_{ort}:60,098
 P_i Birinci Gerilim.....:472,007
 P_i Beşinci Gerilim.....:665,899
 Δ:0,546
 l_0:60.05

$$n = 0.2385$$

$$\sigma_0 = 357,155$$

$$\alpha = 0.0128$$

$$A_{ort} = 1.0906e+003$$

$$T^* = 76,3333$$

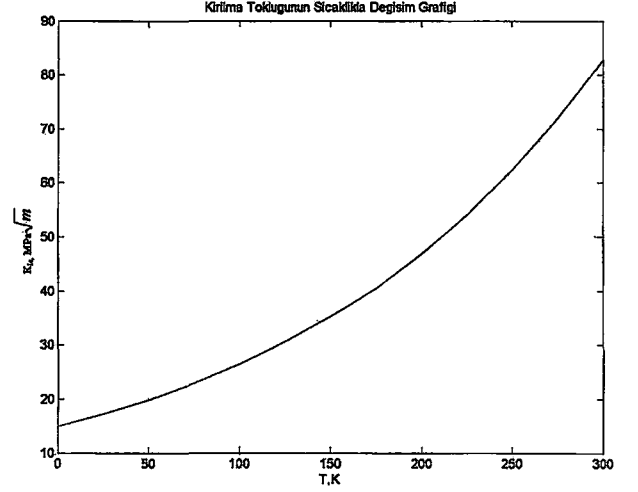
$$S_{fr} = 768,8250$$

$$T^* = 293.000$$

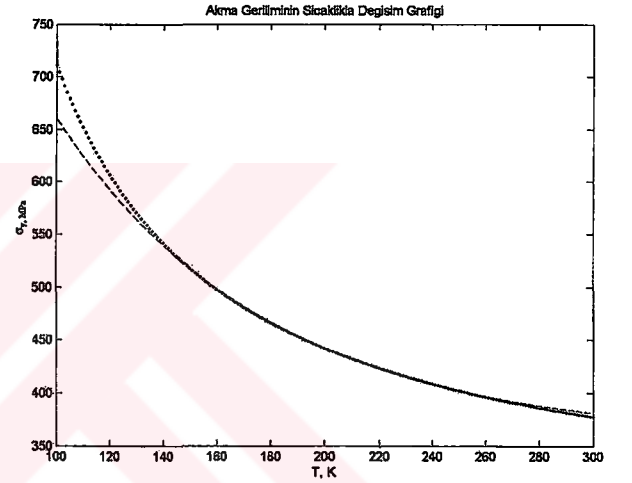
$$K_{1c}^0 = 14,9854$$

$$\kappa = 1.5968$$

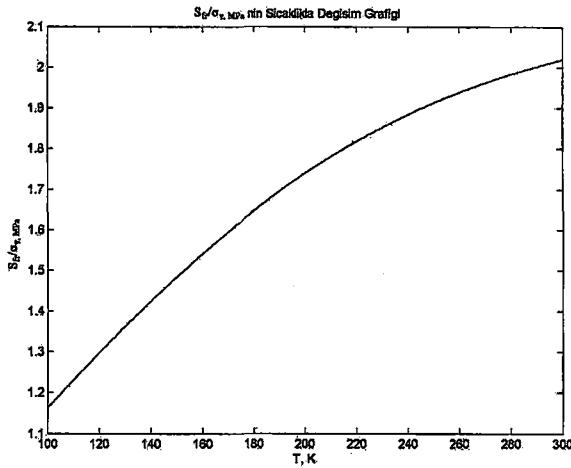
$$K_{1c} = 79,6542$$



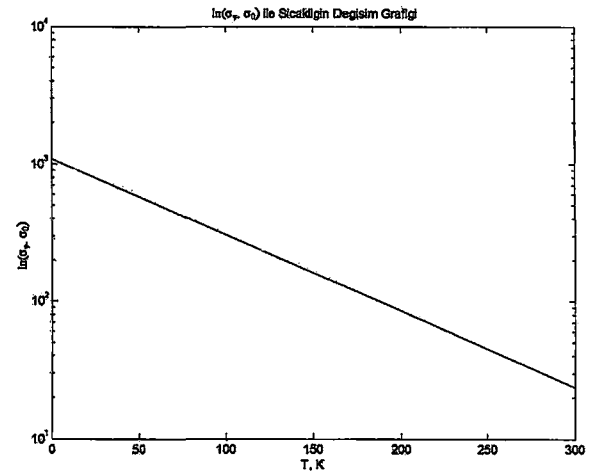
Şekil 5.2 Kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 5.3 Akma geriliminin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 5.1 S_{fr}/σ_y ' nin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 5.4 $\ln(\sigma_y - \sigma_0)$ ile sıcaklığın değişim grafiği

6. AISI 1030 1100 C/1,5 Saat Tam Tavlama (2)

S_{kop} (kopma ger.).....:950,231
 σ_{y0} (akma ger.).....:369,101
 β_y:99
 d_{ort}:75,679
 P_i Birinci Gerilim.....:500,987
 P_i Beşinci Gerilim.....:697,822
 Δ:0,765
 l_0:59,2

$$n = 0.2406$$

$$\sigma_0 = 346,1162$$

$$\alpha = 0.0129$$

$$A_{ort} = 1.1255e+003$$

$$T^* = 77,1317$$

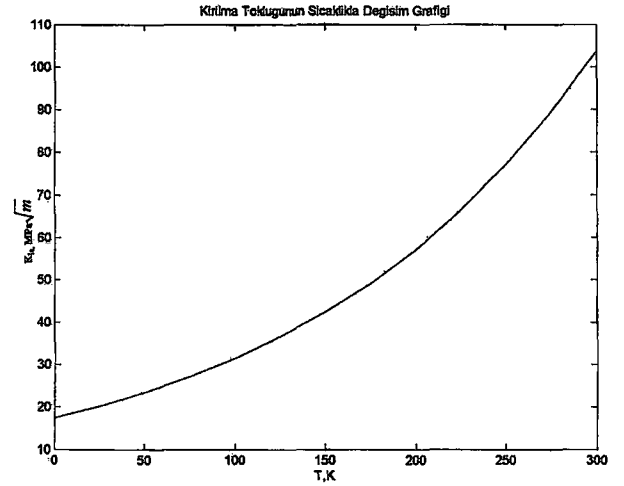
$$S_{fr} = 759,777$$

$$T^* = 293.000$$

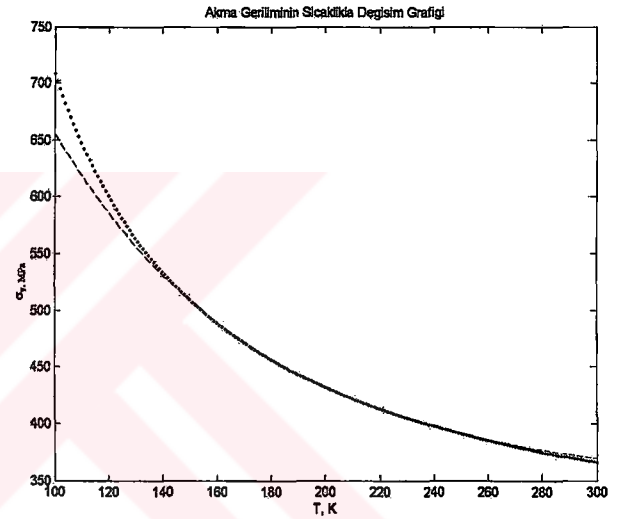
$$K_{Ic}^0 = 17,3546$$

$$\kappa = 1.5784$$

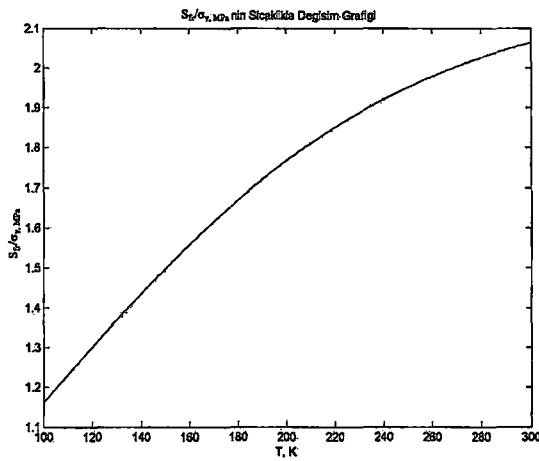
$$K_{Ic} = 99,6037$$



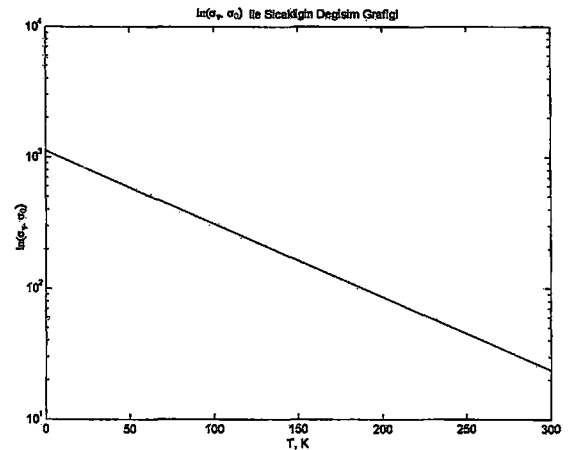
Şekil 6.2 Kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 6.3 Akma geriliminin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 6.1 S_{fr}/σ_y ' nin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 6.4 $\ln(\sigma_y - \sigma_0)$ ile sıcaklığın değişim grafiği

7. AISI 1030 1100 C/1,5 Saat Tam Tavlama (3)

S_{kop} (kopma ger.).....:1035,535
 σ_{y0} (akma ger.).....:390,151
 β_y:93
 d_{ort}:69,659
 P_i Birinci Gerilim.....:528.190
 P_i Beşinci Gerilim.....:743,853
 Δ:0,820
 l_0:61

$$n = 0.2489$$

$$\sigma_0 = 366.8145$$

$$\alpha = 0.0127$$

$$A_{ort} = 1.0847e+003$$

$$T^* = 71,8954$$

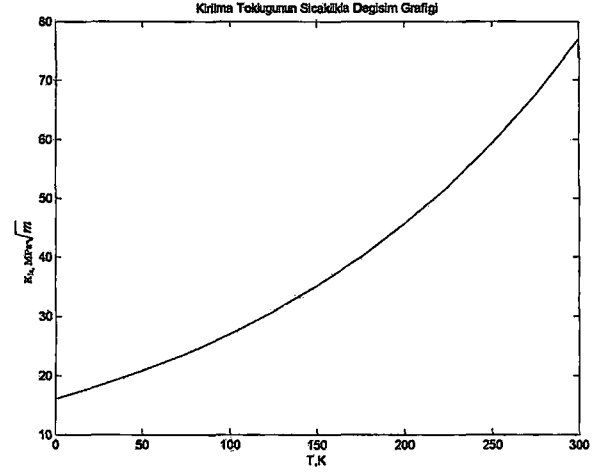
$$S_{fr} = 801.8010$$

$$T^* = 293.000$$

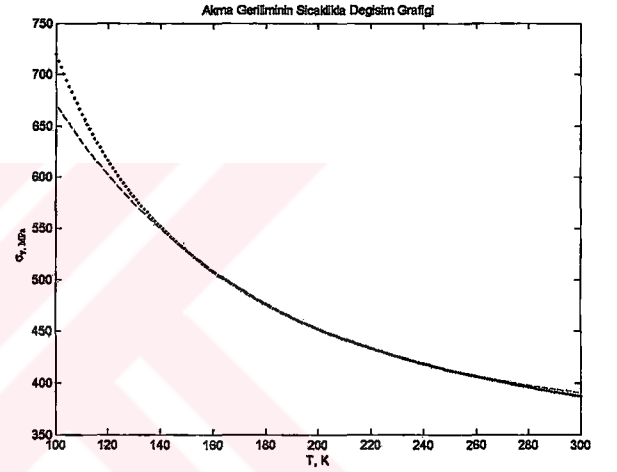
$$K_{Ic}^0 = 16.0462$$

$$\kappa = 1.5090$$

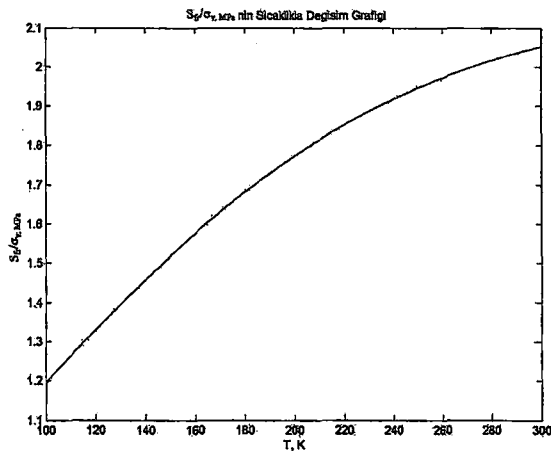
$$K_{Ic} = 74.2517$$



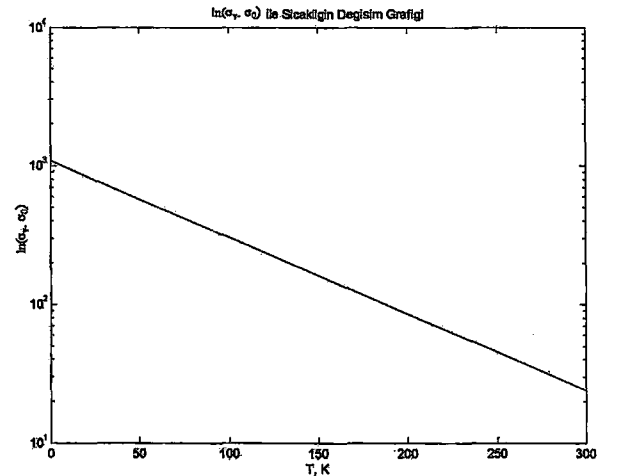
Şekil 7.2 Kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 7.3 Akma geriliminin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 7.1 S_{fr}/σ_y ' nin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 7.4 $\ln(\sigma_y - \sigma_0)$ ile sıcaklığın değişim grafiği

8. AISI 1030 1300 C/2,5 Saat Tam Tavlama (1)

S_{kop} (kopma ger.).....:1061,007
 σ_{y0} (akma ger.).....:362,349
 β_y:101
 d_{ort}:130,425
 P_i Birinci Gerilim.....:562,099
 P_i Beşinci Gerilim.....:790,157
 Δ:0,781
 l_0:59,75

$$n = 0.2467$$

$$\sigma_0 = 339.4989$$

$$\alpha = 0.0129$$

$$A_{ort} = 1.1386e+003$$

$$T^* = 71.1731$$

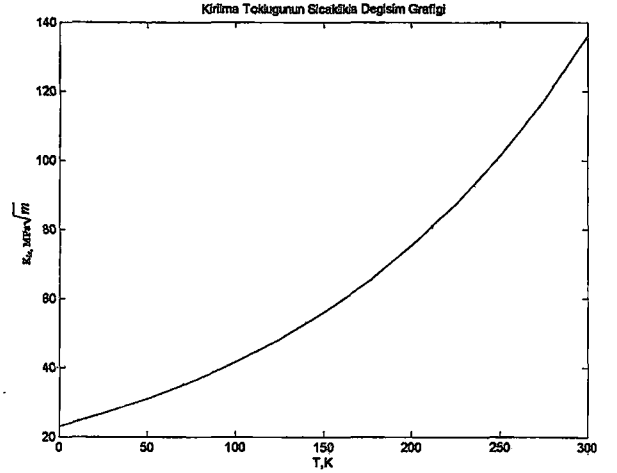
$$S_{fr} = 793.2846$$

$$T^* = 293.000$$

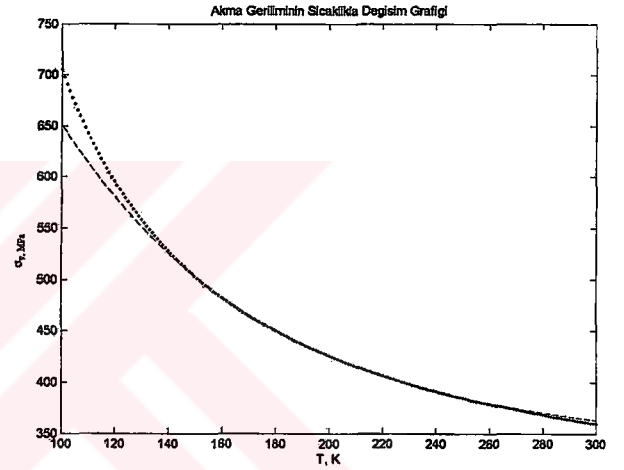
$$K_{Ic}^0 = 23.0472$$

$$\kappa = 1.5264$$

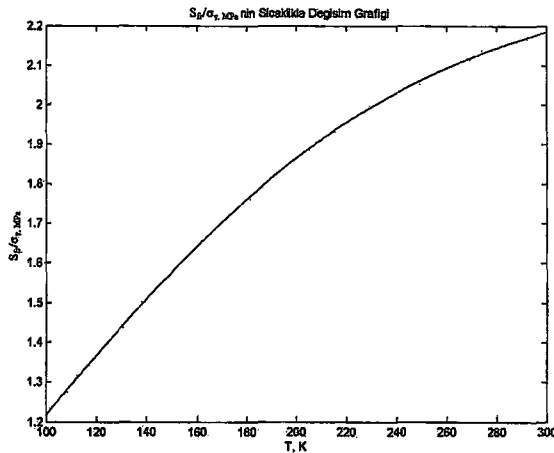
$$K_{Ic} = 130.6771$$



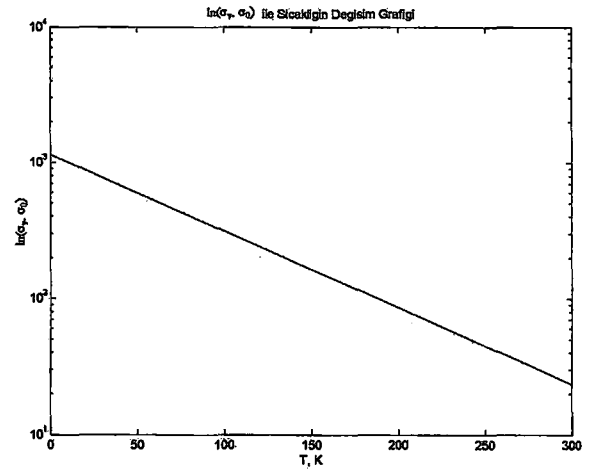
Şekil 8.2 Kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 8.3 Akma geriliminin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 8.1 S_{fr}/σ_y 'nin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 8.4 $\ln(\sigma_y - \sigma_0)$ ile sıcaklığın değişim grafiği

9. AISI 1030 1300 C/2,5 Saat Tam Tavlama (2)

S_{kop} (kopma ger.).....:1035,579
 σ_{y0} (akma ger.).....:375,271
 β_y:98
 d_{ort}:127,708
 P_i Birinci Gerilim.....:564,922
 P_i Beşinci Gerilim.....:808,415
 Δ:0,750
 l_0:61,2

$$n = 0.2558$$

$$\sigma_0 = 352,0522$$

$$\alpha = 0.0128$$

$$A_{ort} = 1.1271e+003$$

$$T^* = 72,6174$$

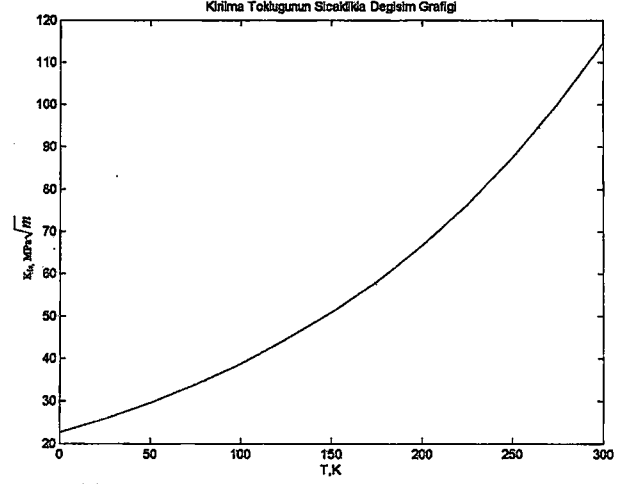
$$S_{fr} = 795.5650$$

$$T^* = 293.000$$

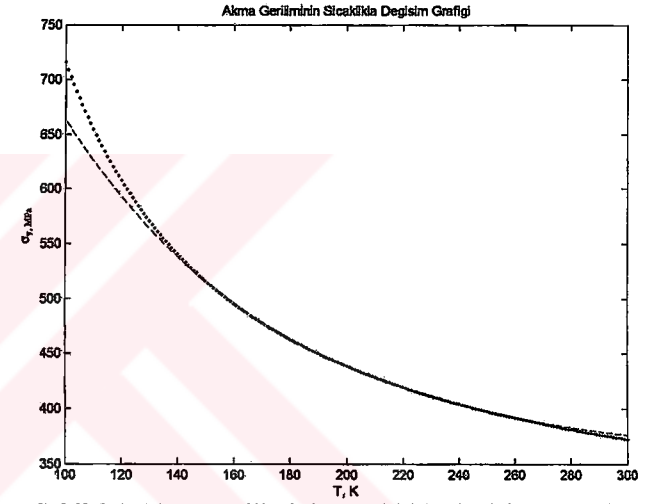
$$K_{Ic}^0 = 22,5766$$

$$\kappa = 1.4543$$

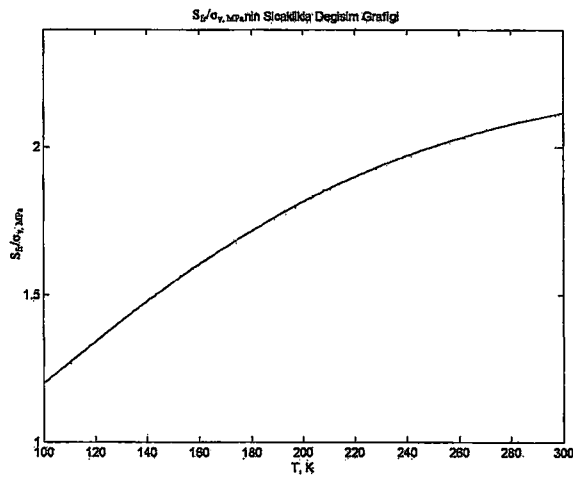
$$K_{Ic} = 110.4991$$



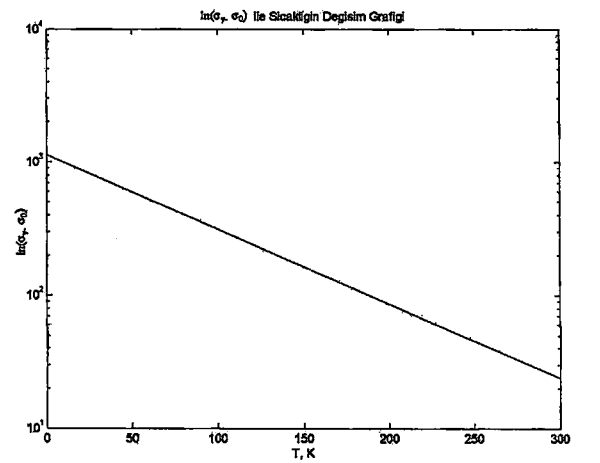
Şekil 9.2 Kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 9.3 Akma geriliminin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 9.1 S_{fr}/σ_y 'nin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 9.4 $\ln(\sigma_y - \sigma_0)$ ile sıcaklığın değişim grafiği

10. AISI 1030 1300 C/2,5 Saat Tam Tavlama (3)

S_{kop} (kopma ger.).....:993,132
 σ_{y0} (akma ger.).....:358,183
 β_y:102,5
 d_{ort}:145,952
 P_i Birinci Gerilim.....:525,773
 P_i Beşinci Gerilim.....:734,689
 Δ:0,787
 l_0:60

$$n = 0.2431$$

$$\sigma_0 = 335,5956$$

$$\alpha = 0.0129$$

$$A_{ort} = 1.1255e+003$$

$$T^* = 74,0182$$

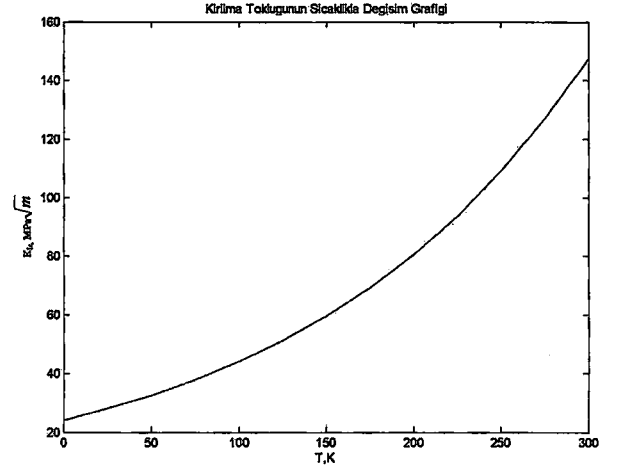
$$S_{fr} = 767.9685$$

$$T^* = 293.000$$

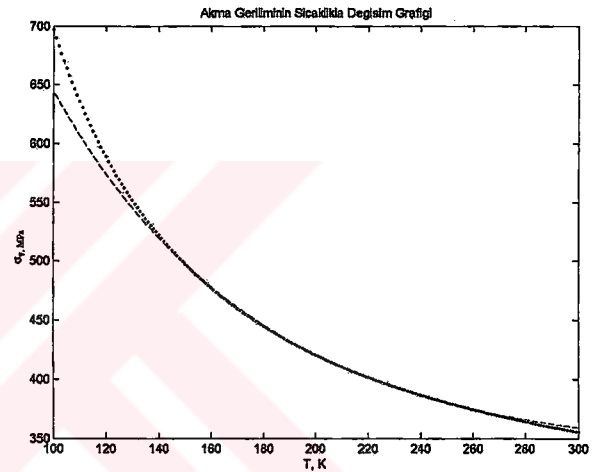
$$K_{1c}^0 = 24,1002$$

$$\kappa = 1.5568$$

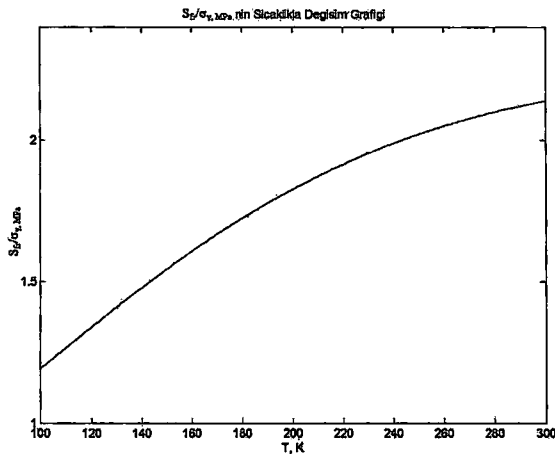
$$K_{1c} = 141.4603$$



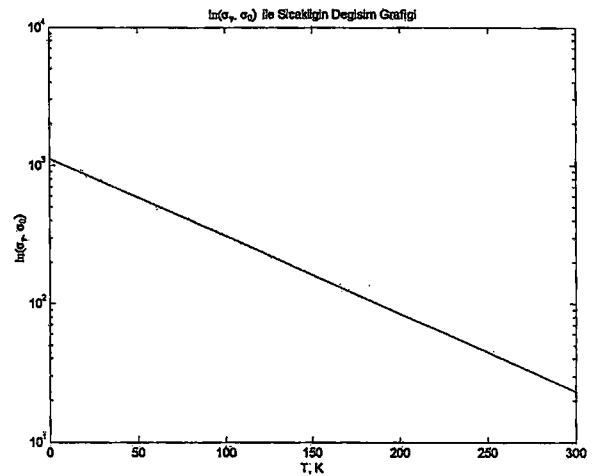
Şekil 10.2 Kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 10.3 Akma geriliminin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 10.1 S_{fr}/σ_y 'nin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 10.4 $\ln(\sigma_y, \sigma_0)$ ile sıcaklığın değişim grafiği

11. AISI 8620 Satıldığı Durum

S_{kop} (kopma ger.).....:1332,273
 σ_{y0} (akma ger.).....:504,314
 β_y:68
 d_{ort}:17,075
 P_i Birinci Gerilim.....:567,410
 P_i Beşinci Gerilim.....:662,416
 Δ:0,303
 l_0:59,15

$$n = 0,1094$$

$$\sigma_0 = 480,1123$$

$$\alpha = 0.0120$$

$$A_{ort} = 906,9111$$

$$T^* = 56,5007$$

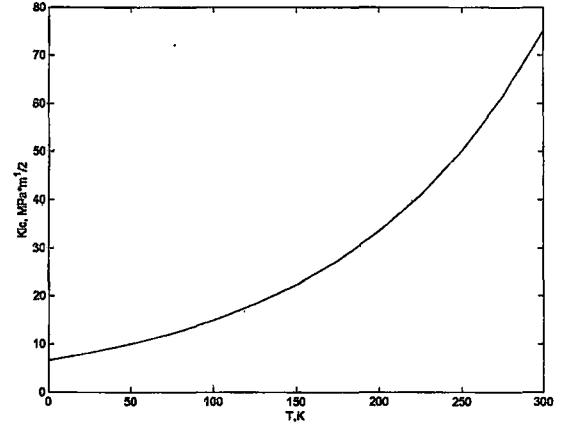
$$S_{fi} = 939,5313$$

$$T^* = 293.000$$

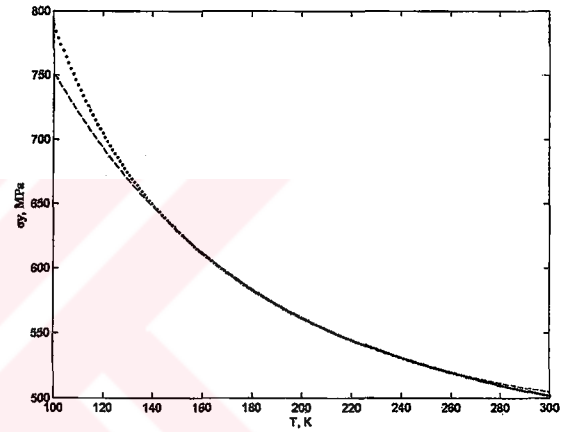
$$K_{Ic}^0 = 6,6423$$

$$\kappa = 4,0697$$

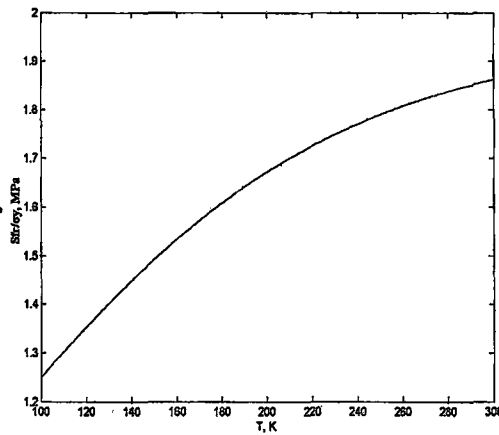
$$K_{Ic} = 70,9462$$



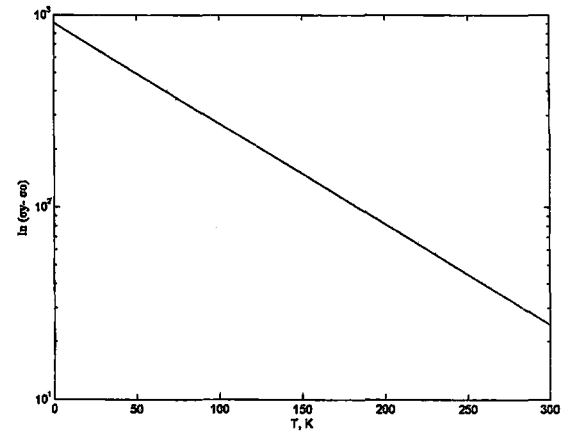
Şekil 11.2 Kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 11.3 Akma geriliminin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 11.1 S_{fi}/σ_y nin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 11.4 $\ln(\sigma_y - \sigma_0)$ ile sıcaklığın değişim grafiği

12. AISI 8620 950 C/1 Saat Tam Tavlama (1)

S_{kop} (kopma ger.).....:1211,937
 σ_{y0} (akma ger.).....:424,470
 β_y:82
 d_{ort}:21,971
 P_i Birinci Gerilim.....:501,955
 P_i Beşinci Gerilim.....:617,221
 Δ:0,818
 l_0:60,1

$$n = 0,1636$$

$$\sigma_0 = 401,151$$

$$\alpha = 0.0124$$

$$A_{ort} = 985,506$$

$$T^* = 61,700$$

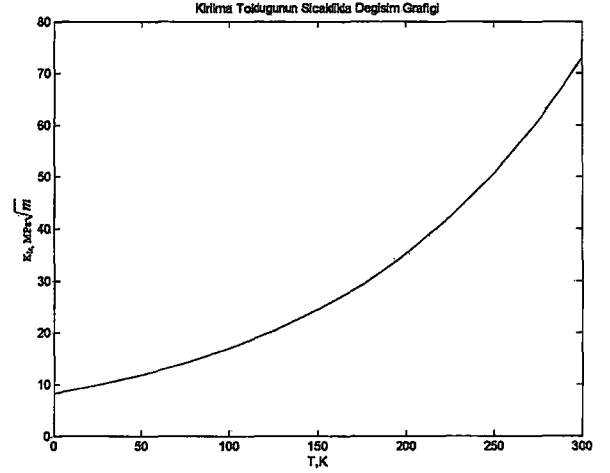
$$S_{fr} = 859,329$$

$$T^* = 293.000$$

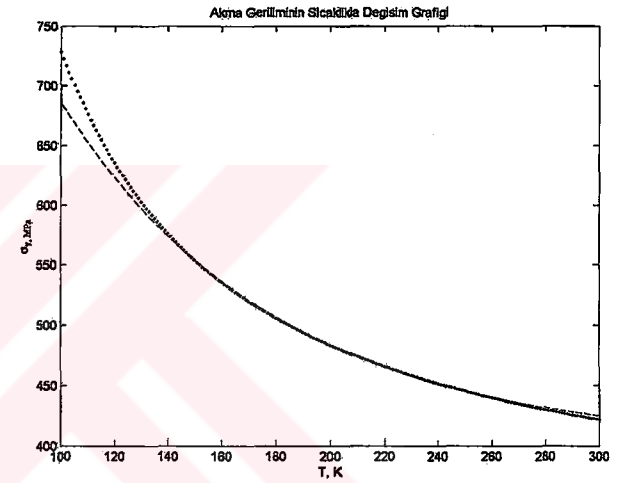
$$K_{ic}^0 = 8,1876$$

$$\kappa = 2,5558$$

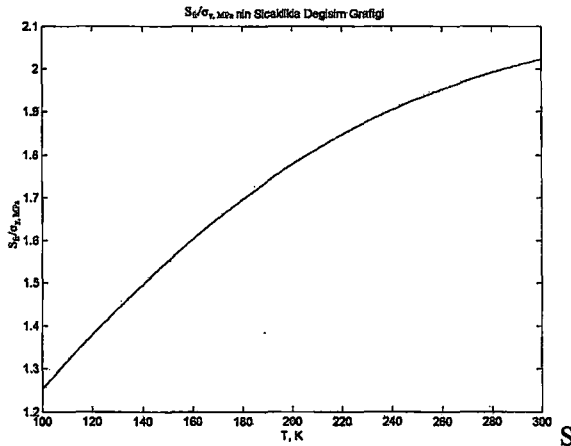
$$K_{ic} = 69,3803$$



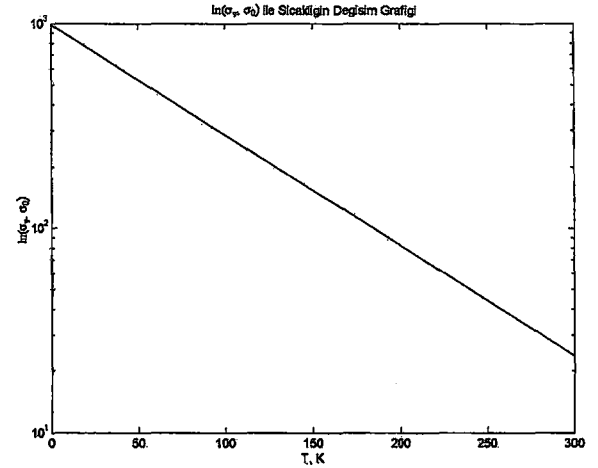
Şekil 12.2 Kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 12.3 Akma geriliminin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 12.1 S_{fr}/σ_y 'nin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 12.4 $\ln(\sigma_y - \sigma_0)$ ile sıcaklığın değişim grafiği

13. AISI 8620 950 C/1 Saat Tam Tavlama (2)

S_{kop} (kopma ger.).....:1289,949
 σ_{y0} (akma ger.).....:406,278
 β_y:87
 d_{ort}:24,039
 P_i Birinci Gerilim.....:499,377
 P_i Beşinci Gerilim.....:620,786
 Δ:0,878
 l_0:59,7

$$n = 01733$$

$$\sigma_0 = 383,033$$

$$\alpha = 0.0125$$

$$A_{ort} = 1.0257e+003$$

$$T^* = 59,907$$

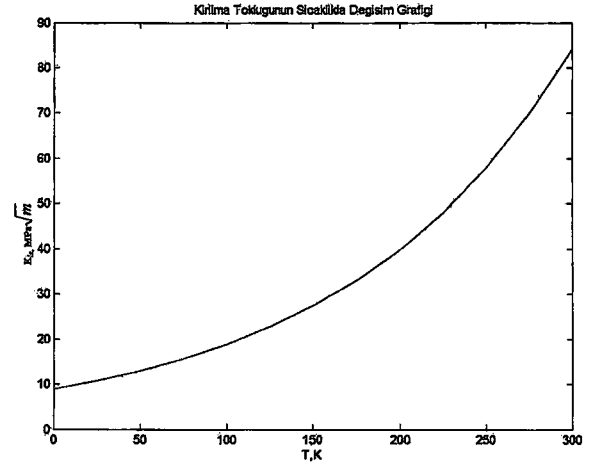
$$S_{fr} = 866,732$$

$$T^* = 293.000$$

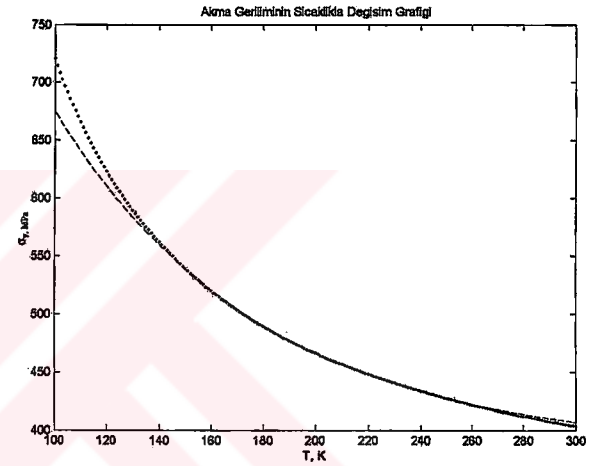
$$K_{1c}^0 = 8,9139$$

$$\kappa = 2,3853$$

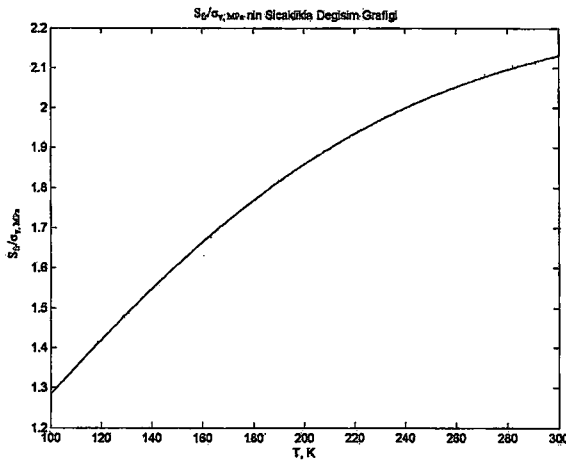
$$K_{1c} = 79,9034$$



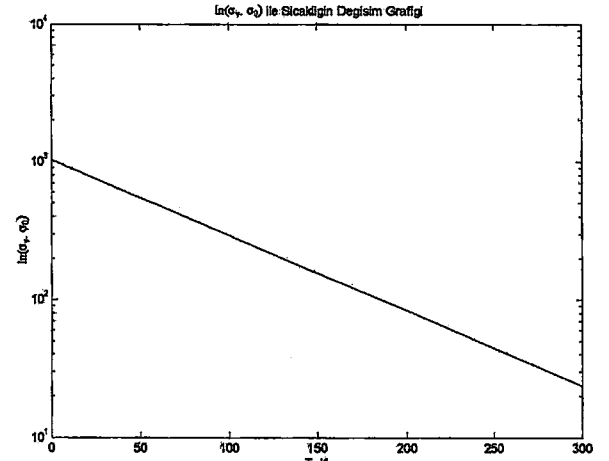
Şekil 13.2 Kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 13.3 Akma geriliminin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 13.1 S_{fr}/σ_y 'nin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 13.4 $\ln(\sigma_y - \sigma_0)$ ile sıcaklığın değişim grafiği

14. AISI 8620 950 C/1 Saat Tam Tavlama (3)

S_{kop} (kopma ger.).....:1264,106
 σ_{y0} (akma ger.).....:434,794
 β_y:81
 d_{ort}:23,852
 P_i Birinci Gerilim.....:499,453
 P_i Beşinci Gerilim.....:614,595
 Δ:0,875
 l_0:61,05

$$n = 0,1659$$

$$\sigma_0 = 411,112$$

$$\alpha = 0.0124$$

$$A_{ort} = 992,282$$

$$T^* = 60,281$$

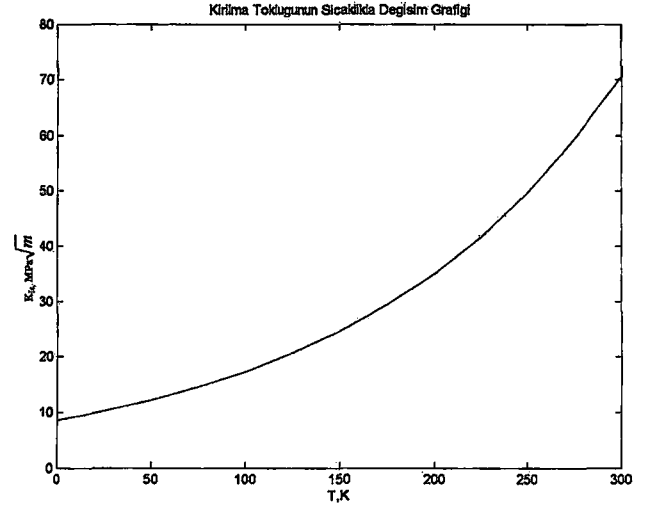
$$S_{fr} = 881,401$$

$$T^* = 293.000$$

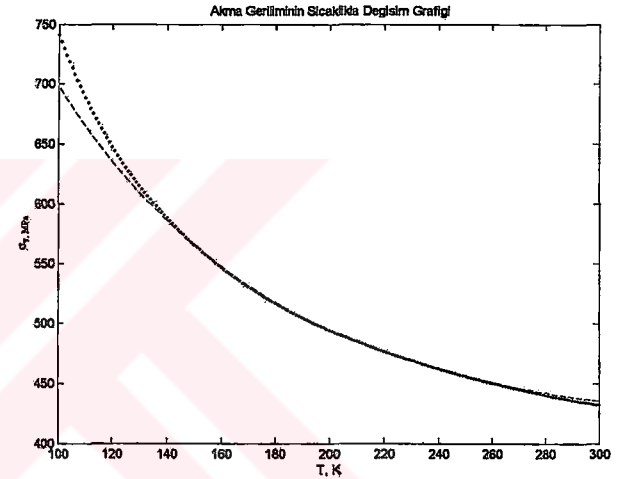
$$K_{Ic}^0 = 8,5896$$

$$\kappa = 2,5137$$

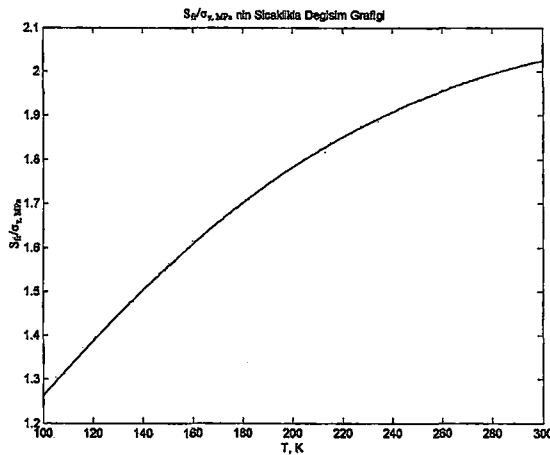
$$K_{Ic} = 67,3151$$



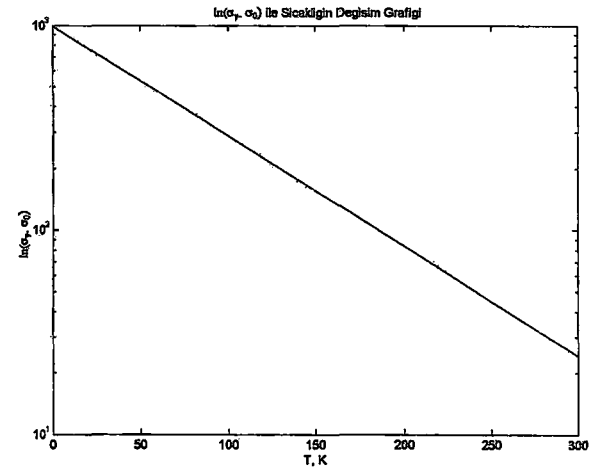
Şekil 14.2 Kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 14.3 Akma geriliminin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 14.1 S_{fr}/σ_y 'nin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 14.4 $\ln(\sigma_y - \sigma_0)$ ile sıcaklığın değişim grafiği

**15. AISI 8620 1150 C/1,5 SAAT
TAM TAVLAMA (1)**

S_{kop} (kopma ger.).....:1171,690
 σ_{y0} (akma ger.).....:298,840
 β_y:120
 d_{ort}:55,225
 P_i Birinci Gerilim.....:372,433
 P_i Beşinci Gerilim.....:491,573
 Δ:0,781
 l_0:62,4

$n = 0,2055$

$\sigma_0 = 277,9736$

$\alpha = 0.0134$

$A_{ort} = 1,280e+003$

$T^* = 67,573$

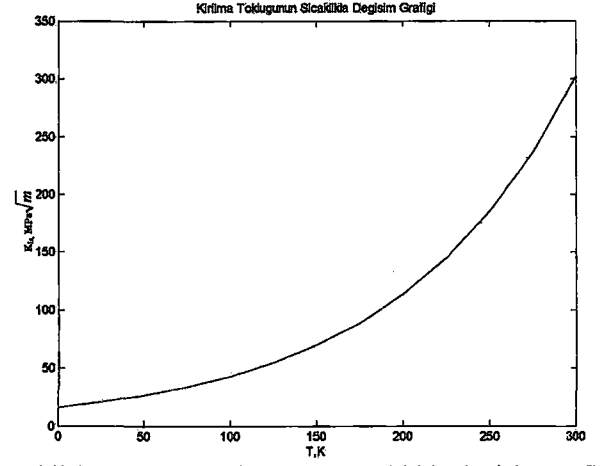
$S_{fr} = 773,232$

$T^* = 273,025$

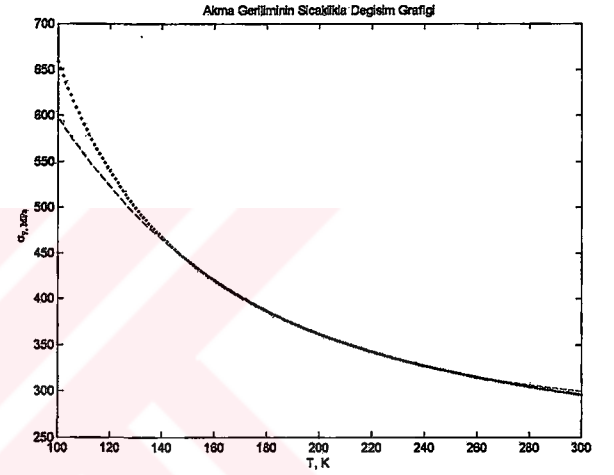
$K_{Ic}^0 = 16,1745$

$\kappa = 1,9326$

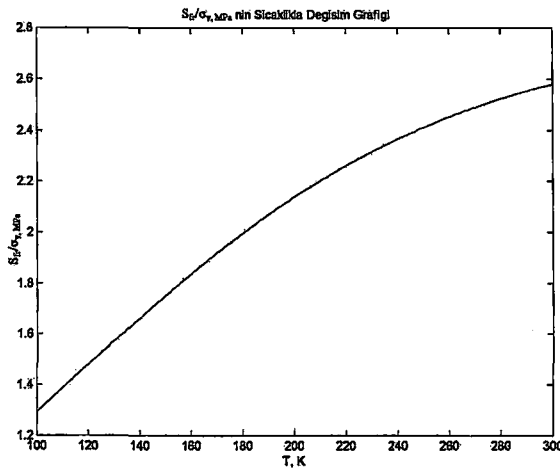
$K_{Ic} = 282,3433$



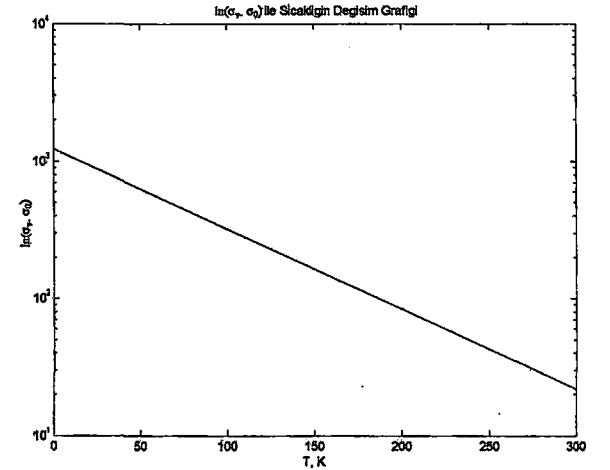
Şekil 15.2 Kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 15.3 Akma geriliminin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 15.1 S_{fr}/σ_y ' nin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 15.4 $\ln(\sigma_y - \sigma_0)$ ile sıcaklığın değişim grafiği

16. AISI 8620 1150 C/1,5 Saat Tam Tavlama (2)

S_{kop} (kopma ger.).....:1144,344
 σ_{y0} (akma ger.).....:296,298
 β_y:121
 d_{ort}:54,247
 P_i Birinci Gerilim.....:376,795
 P_i Beşinci Gerilim.....:500,850
 Δ:0,781
 l_0:61,05

$n = 0,2107$

$\sigma_0 = 275,514$

$\alpha = 0.0135$

$A_{ort} = 1,2339e+003$

$T^* = 68,5867$

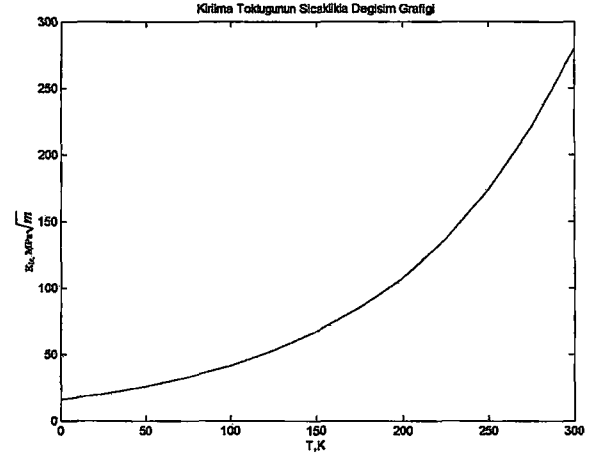
$S_{fr} = 765,540$

$T^* = 274,316$

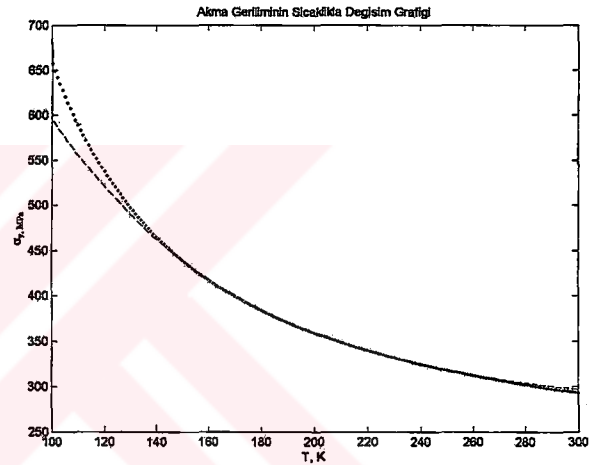
$K_{1c}^0 = 16,1086$

$\kappa = 1,8730$

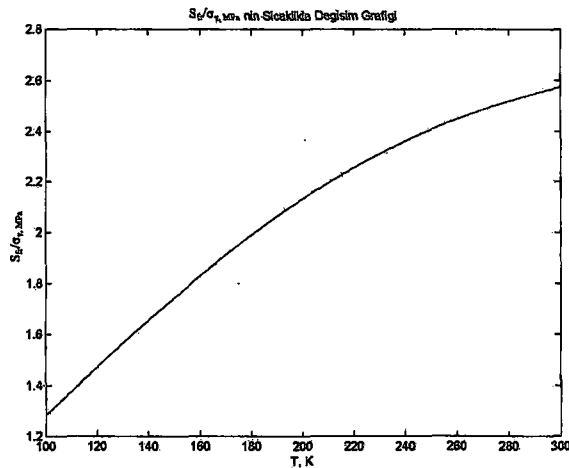
$K_{1c} = 261,7622$



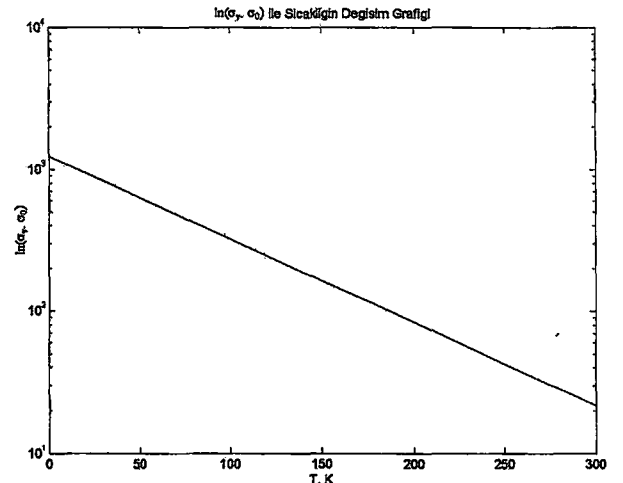
Şekil 16.2 Kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 16.3 Akma geriliminin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 16.1 S_{fr}/σ_y 'nin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 16.4 $\ln(\sigma_y, \sigma_0)$ ile sıcaklığın değişim grafiği

17. AISI 8620 1300 C/2,5 Saat Tam Tavlama (1)

S_{kop} (kopma ger.).....:795,840
 σ_{y0} (akma ger.).....:278,518
 β_y:128
 d_{ort}:61,919
 P_i Birinci Gerilim.....:351,569
 P_i Beşinci Gerilim.....:466,689
 Δ:0,754
 l_0:60,8

$$n = 0,2088$$

$$\sigma_0 = 258,382$$

$$\alpha = 0.0137$$

$$A_{ort} = 1,2717e+003$$

$$T^* = 86,092$$

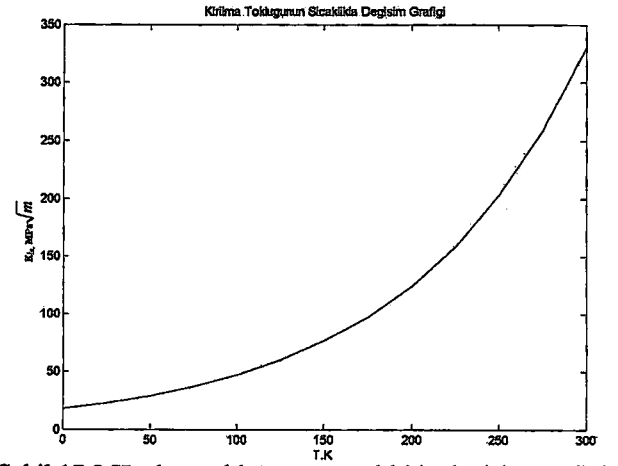
$$S_{fr} = 650,901$$

$$T^* = 293,000$$

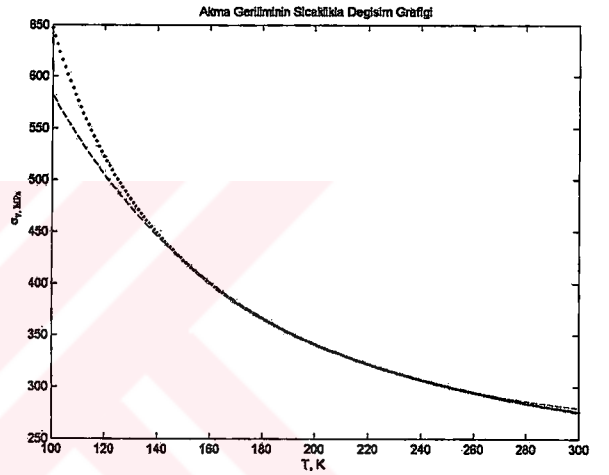
$$K_{1c}^0 = 17,7365$$

$$\kappa = 1,8942$$

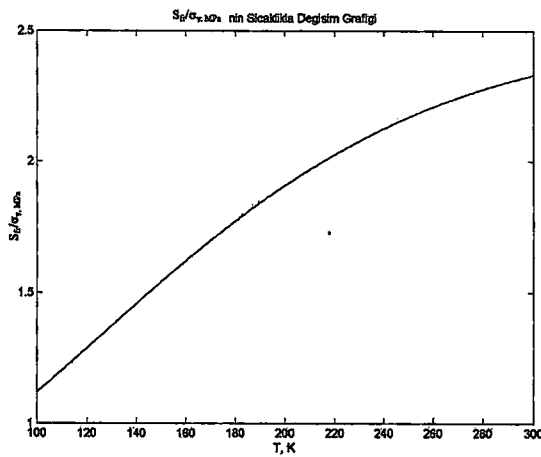
$$K_{1c} = 308,2441$$



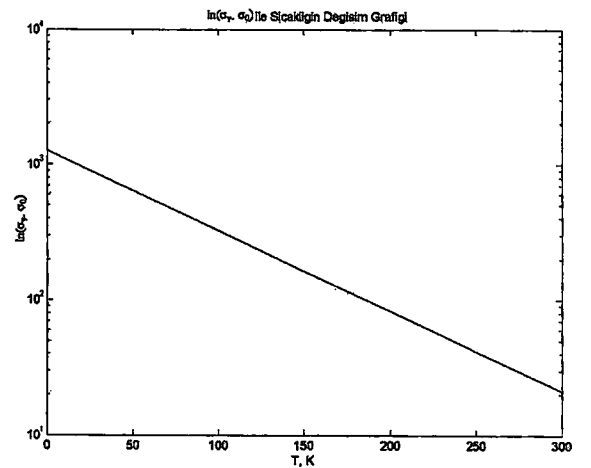
Şekil 17.2 Kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 17.3 Akma geriliminin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 17.1 S_{fr}/σ_y ' nin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 17.4 $\ln(\sigma_y - \sigma_0)$ ile sıcaklığın değişim grafiği

18. AISI 8620 1300 C/2,5 Saat Tam Tavlama (2)

S_{kop} (kopma ger.).....:887,990
 σ_{y0} (akma ger.).....:273,611
 β_y:131
 d_{ort}:68,111
 P_i Birinci Gerilim.....:347,857
 P_i Beşinci Gerilim.....:463,481
 Δ:0,765
 l_0:60,55

$$n = 0,2118$$

$$\sigma_0 = 253,591$$

$$\alpha = 0.0137$$

$$A_{ort} = 1,2984e+003$$

$$T^* = 80,647$$

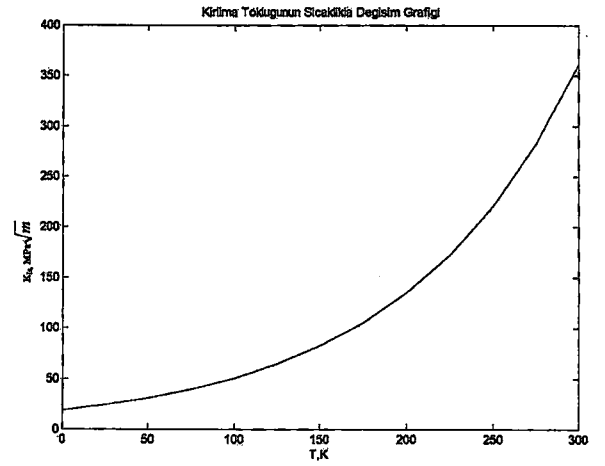
$$S_{fr} = 682,469$$

$$T^* = 293,000$$

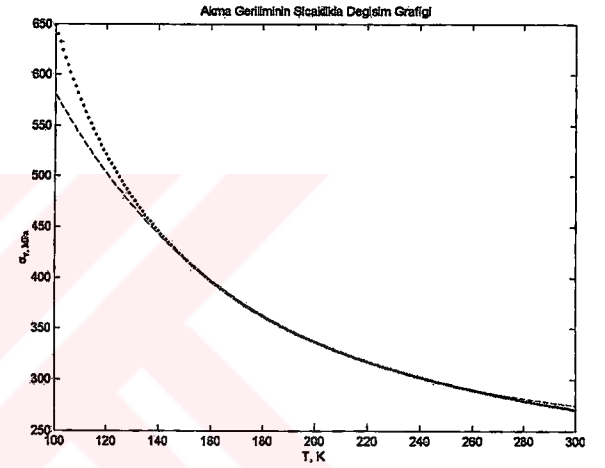
$$K_{Ic}^0 = 18,9930$$

$$\kappa = 1,8608$$

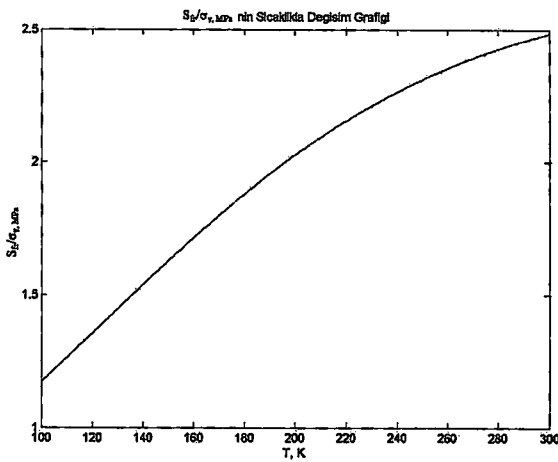
$$K_{Ic} = 337,0255$$



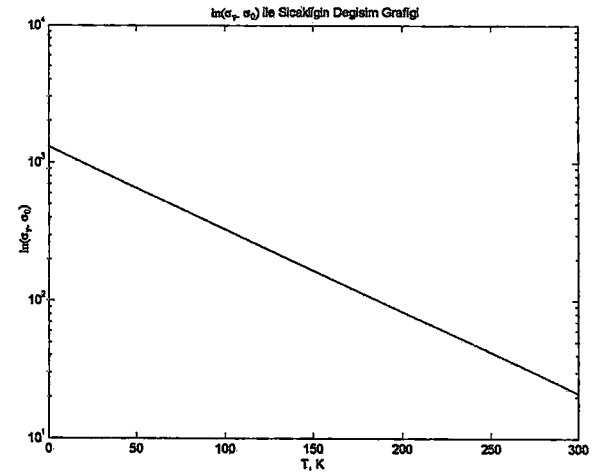
Şekil 18.2 Kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 18.3 Akma geriliminin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 18.1 S_{fr}/σ_y 'nin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 18.4 $\ln(\sigma_y - \sigma_0)$ ile sıcaklığın değişim grafiği

19. AISI 8620 1300 C/2,5 Saat Tam Tavlama (3)

S_{kop} (kopma ger.).....:853,055
 σ_{y0} (akma ger.).....:250,829
 β_y:136,5
 d_{ort}:71,279
 P_i Birinci Gerilim.....:277,068
 P_i Beşinci Gerilim.....:381,014
 Δ:0,462
 l_0:59,9

$$n = 0,2187$$

$$\sigma_0 = 232,0935$$

$$\alpha = 0.0139$$

$$A_{ort} = 1,2759e+003$$

$$T^* = 80,7729$$

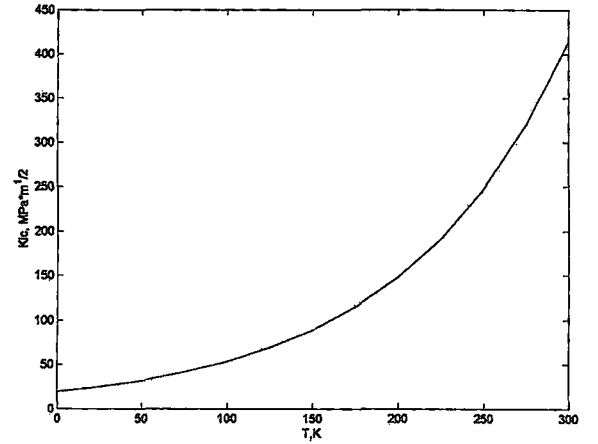
$$S_{fr} = 647,7869$$

$$T^* = 277,6402$$

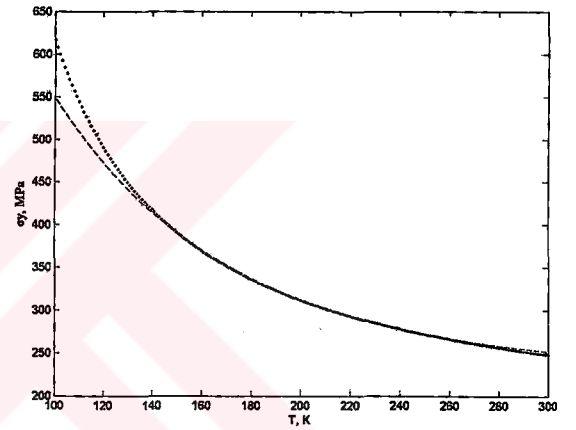
$$K_{Ic}^0 = 19,0929$$

$$\kappa = 1,7859$$

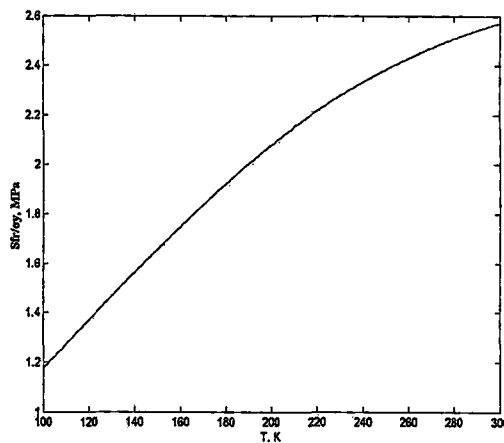
$$K_{Ic} = 385,1936$$



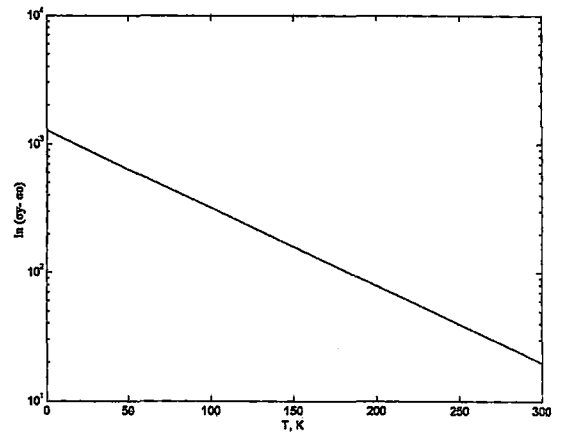
Şekil 19.2 Kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 19.3 Akma geriliminin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 19.1 S_{fr}/σ_y 'nin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 19.4 $\ln(\sigma_y/\sigma_0)$ ile sıcaklığın değişim grafiği

20. AISI 1016 Satıldığı Durum

S_{kop} (kopma ger.).....:1327,112
 σ_{y0} (akma ger.).....:365,071
 β_y:98,5
 d_{ort}:20,016
 P_i Birinci Gerilim.....:439,177
 P_i Beşinci Gerilim.....:535,159
 Δ:0,673
 l_0:61,45

$$n = 0,1512$$

$$\sigma_0 = 342,4100$$

$$\alpha = 0.0129$$

$$A_{ort} = 1,1048e+003$$

$$T^* = 60,5466$$

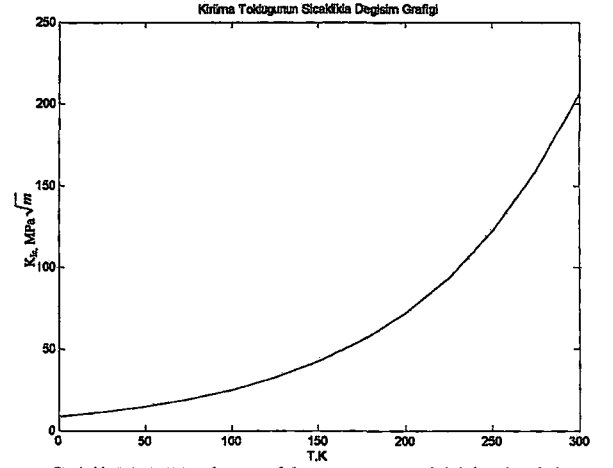
$$S_{fr} = 849,6464$$

$$T^* = 293.000$$

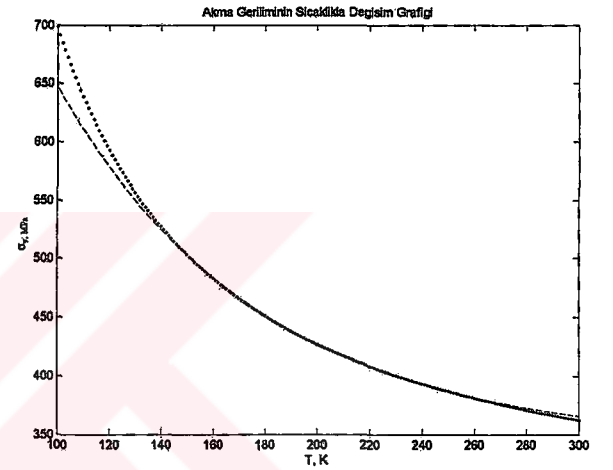
$$K_{Ic}^0 = 8,7612$$

$$\kappa = 2,8074$$

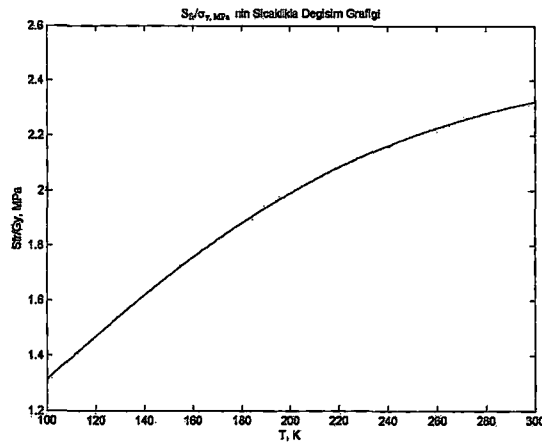
$$K_{Ic} = 191,9342$$



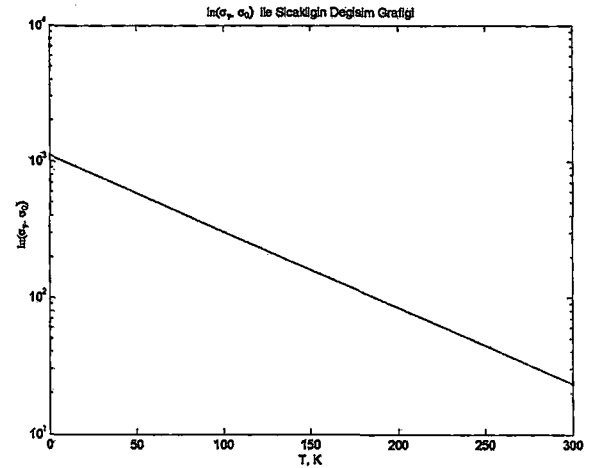
Şekil 20.2 Kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 20.3 Akma geriliminin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 20.1 S_{fr}/σ_y 'nin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 20.4 $\ln(\sigma_y \cdot \sigma_0)$ ile sıcaklığın değişim grafiği

21. AISI 1016 950 C/1 Saat Tam Tavlama (1)

S_{kop} (kopma ger.).....:1161,481
 σ_{y0} (akma ger.).....:335,038
 β_y:108,5
 d_{ort}:20,213
 P_i Birinci Gerilim.....:390,175
 P_i Beşinci Gerilim.....:475,376
 Δ:0,634
 l_0:58,65

$$n = 0,1507$$

$$\sigma_0 = 312,9637$$

$$\alpha = 0.0131$$

$$A_{ort} = 1.1743e+003$$

$$T^* = 67,2445$$

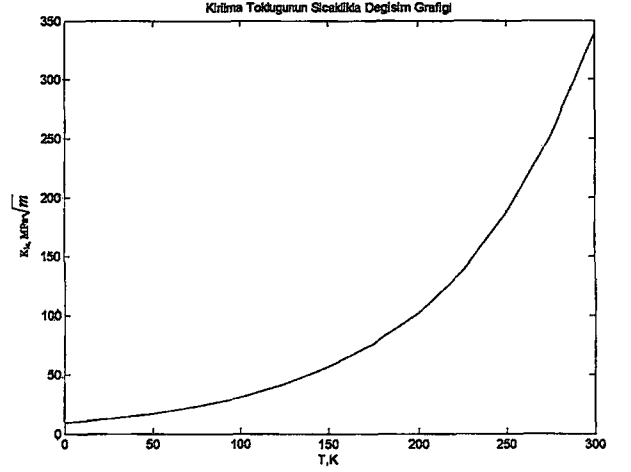
$$S_{fr} = 798,7290$$

$$T^* = 293.000$$

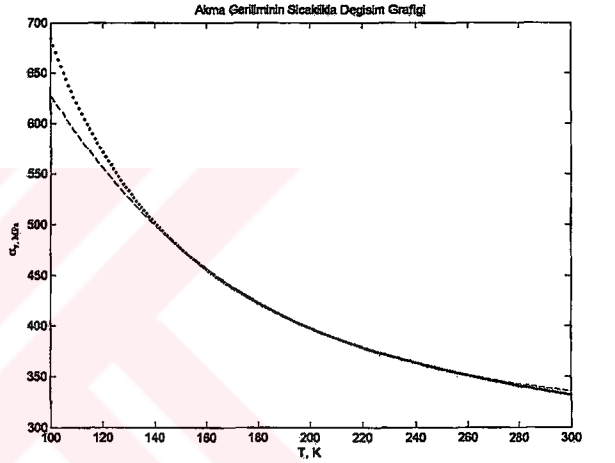
$$K_{Ic}^0 = 9,3580$$

$$\kappa = 2,8175$$

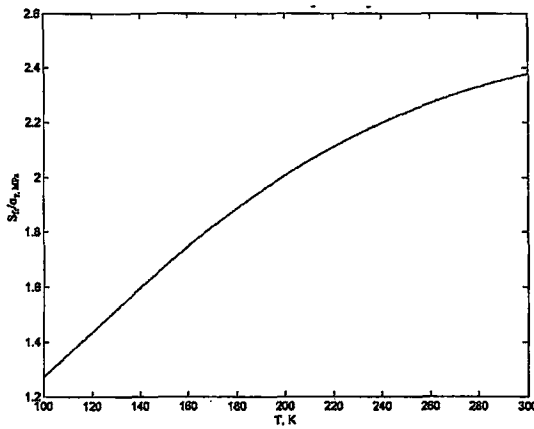
$$K_{Ic} = 312,5466$$



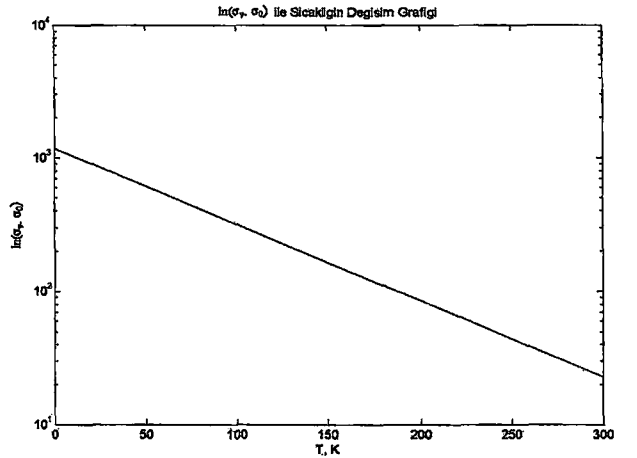
Şekil 21.2 Kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 21.3 Akma geriliminin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 21.1 S_{fr}/σ_y ' nin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 21.4 $\ln(\sigma_y - \sigma_0)$ ile sıcaklığın değişim grafiği

22. AISI 1016 950 C/1 Saat Tam Tavlama (2)

S_{kop} (kopma ger.).....:1109,255
 σ_{y0} (akma ger.).....:329,890
 β_y:110
 d_{ort}:21,332
 P_i Birinci Gerilim.....:378,548
 P_i Beşinci Gerilim.....:463,468
 Δ:0,637
 l_0:58,25

$$n = 0,1541$$

$$\sigma_0 = 307,9766$$

$$\alpha = 0.0132$$

$$A_{ort} = 1.1812e+003$$

$$T^* = 69,2647$$

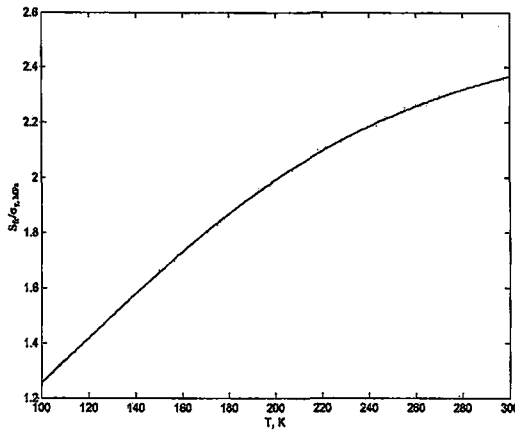
$$S_{ff} = 782,4530$$

$$T^* = 293.000$$

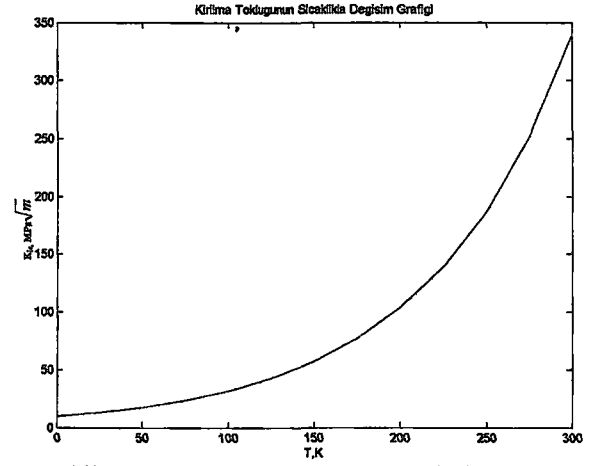
$$K_{Ic}^0 = 9,6696$$

$$\kappa = 2,7444$$

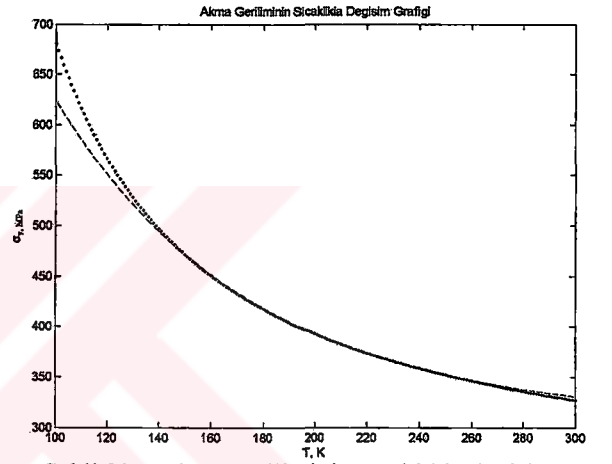
$$K_{Ic} = 312,4611$$



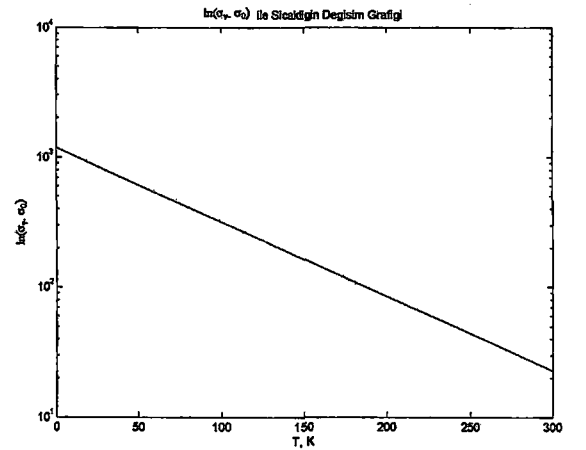
Şekil 22.1 S_{ff}/σ_y 'nin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 22.2 Kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 22.3 Akma geriliminin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 22.4 $\ln(\sigma_y - \sigma_0)$ ile sıcaklığın değişim grafiği

23. AISI 1016 950 C/1 Saat Tam Tavlama (3)

S_{kop} (kopma ger.).....:1061,639
 σ_{y0} (akma ger.).....:323,260
 β_y:111
 d_{ort}:20,016
 P_i Birinci Gerilim.....:390,014
 P_i Beşinci Gerilim.....:475,404
 Δ: 0,700
 l_0:57,2

$$n = 0,1546$$

$$\sigma_0 = 301,6720$$

$$\alpha = 0,0132$$

$$A_{ort} = 1,1739e+003$$

$$T^* = 70,7930$$

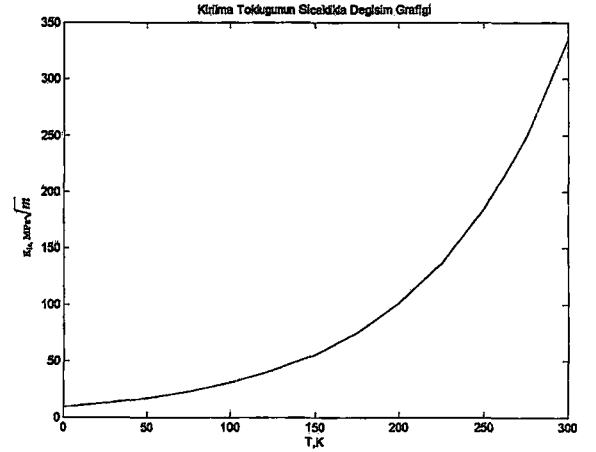
$$S_{fr} = 762,9368$$

$$T^* = 293,000$$

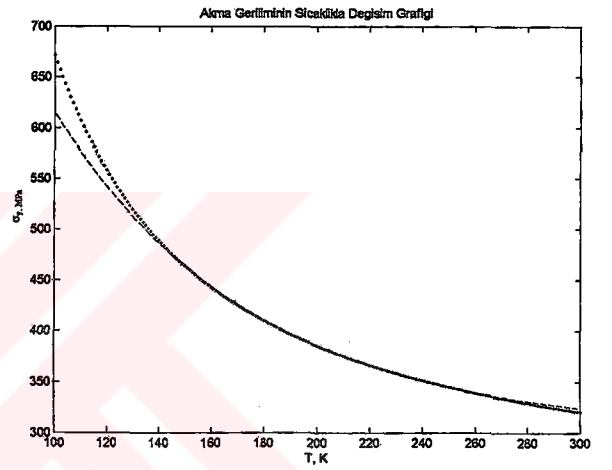
$$K_{1c}^0 = 9,3087$$

$$\kappa = 2,7333$$

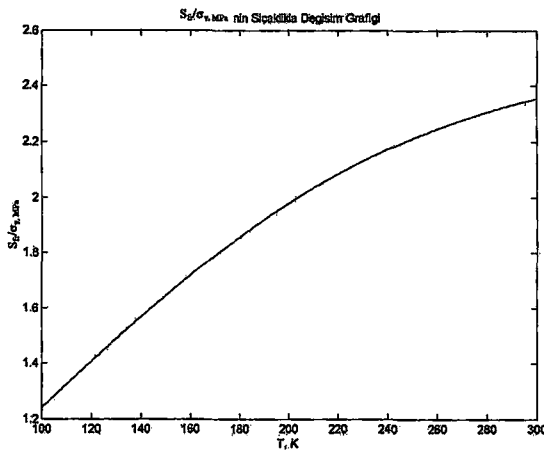
$$K_{1c} = 308,1815$$



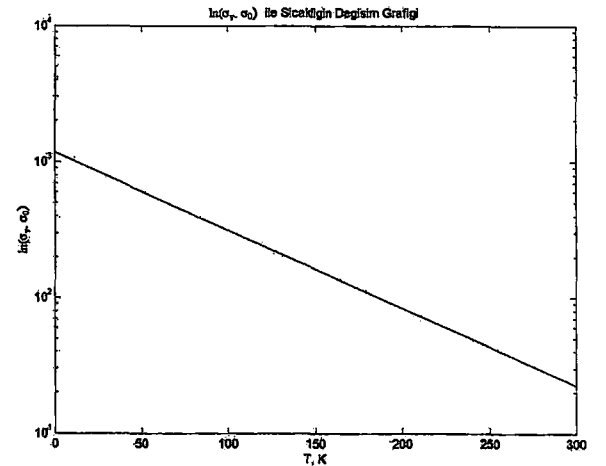
Şekil 23.2 Kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 23.3 Akma geriliminin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 23.1 S_{fr}/σ_y 'nin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 23.4 $\ln(\sigma_y, \sigma_0)$ ile sıcaklığın değişim grafiği

24. AISI 1016 1150 C/1,5 Saat Tam Tavlama (1)

S_{kop} (kopma ger.).....:1009,308
 σ_{y0} (akma ger.).....:252,730
 β_y:139,5
 d_{ort}:54,557
 P_i Birinci Gerilim.....:319,346
 P_i Beşinci Gerilim.....:437,973
 Δ:0,802
 l_0: 59,4

$$n = 0,2323$$

$$\sigma_0 = 233,6525$$

$$\alpha = 0,0140$$

$$A_{ort} = 1,3344e+003$$

$$T^* = 74,9674$$

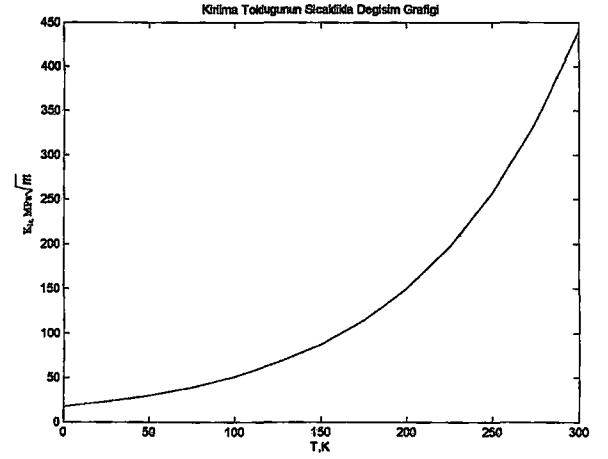
$$S_{fr} = 702,0218$$

$$T^* = 239,3597$$

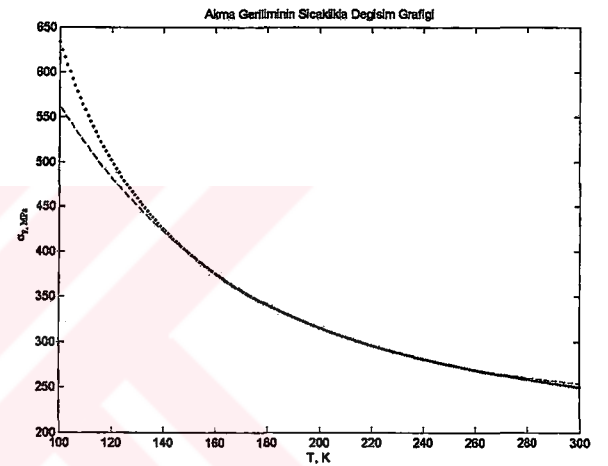
$$K_{1c}^0 = 17,4691$$

$$\kappa = 1,6524$$

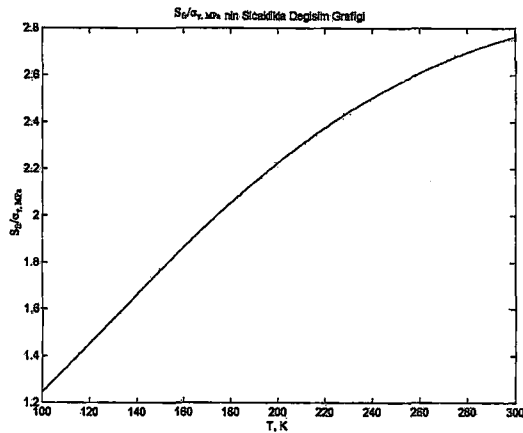
$$K_{1c} = 408,6679$$



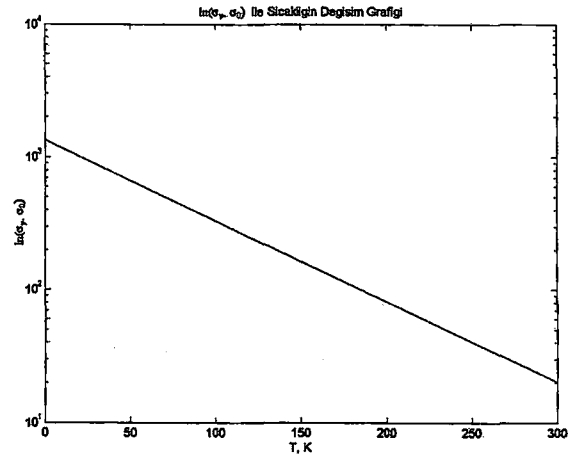
Şekil 24.2 Kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 24.3 Akma geriliminin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 24.1 S_{fr}/σ_y 'nin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 24.4 $\ln(\sigma_y - \sigma_0)$ ile sıcaklığın değişim grafiği

25. AISI 1016 1150 C/1,5 Saat Tam Tavlama (2)

S_{kop} (kopma ger.).....:1071,054
 σ_{y0} (akma ger.).....:235,693
 β_y:149
 d_{ort}:53,608
 P_i Birinci Gerilim.....:306,082
 P_i Beşinci Gerilim.....:428,561
 Δ:0,893
 l_0:59,4

$n = 0,2494$

$\sigma_0 = 217,3538$

$\alpha = 0,0142$

$A_{ort} = 1,3964e+003$

$T^* = 73,6748$

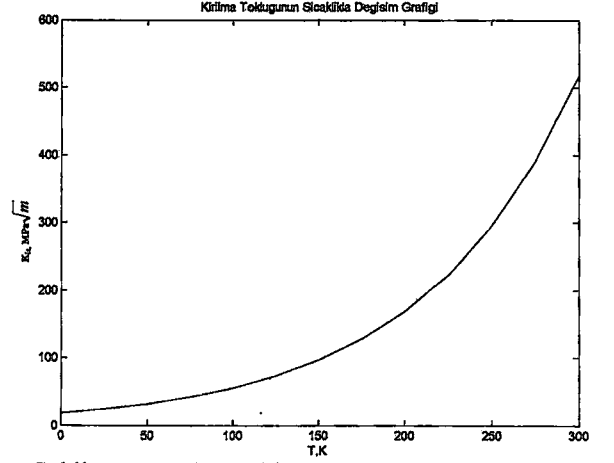
$S_{fr} = 707,0460$

$T^* = 215,1575$

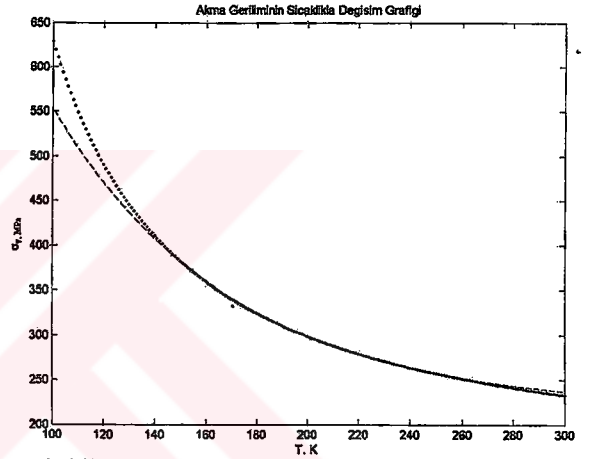
$K_{Ic}^0 = 18,1214$

$\kappa = 1,5050$

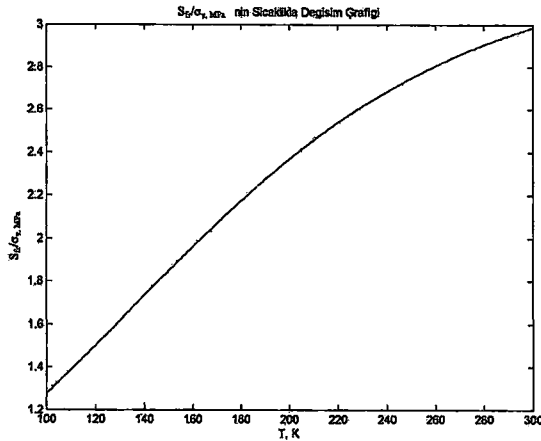
$K_{Ic} = 478,0417$



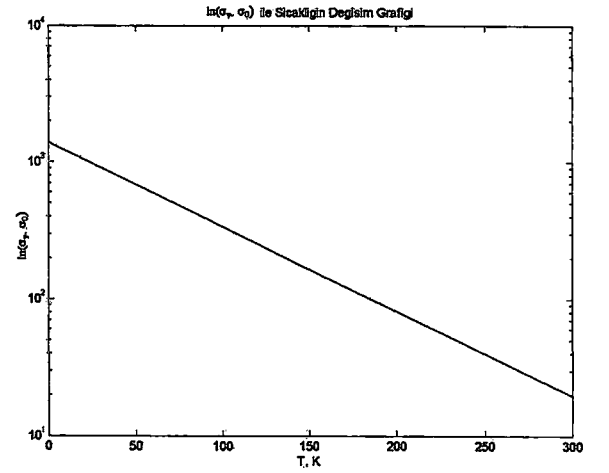
Şekil 25.2 Kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 25.3 Akma geriliminin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 25.1 S_{fr}/σ_y 'nin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 25.4 $\ln(\sigma_y - \sigma_0)$ ile sıcaklığın değişim grafiği

26. AISI 1016 1150 C/1,5 Saat Tam Tavlama (3)

S_{kop} (kopma ger.).....:1164,056
 σ_{y0} (akma ger.).....:225,927
 β_y:153
 d_{ort}:56,559
 P_i Birinci Gerilim.....:291,523
 P_i Beşinci Gerilim.....:420,902
 Δ:0,820
 l_0:59,25

$$n = 0,2657$$

$$\sigma_0 = 208,1448$$

$$\alpha = 0,0143$$

$$A_{ort} = 1,4035e+003$$

$$T^* = 70,7797$$

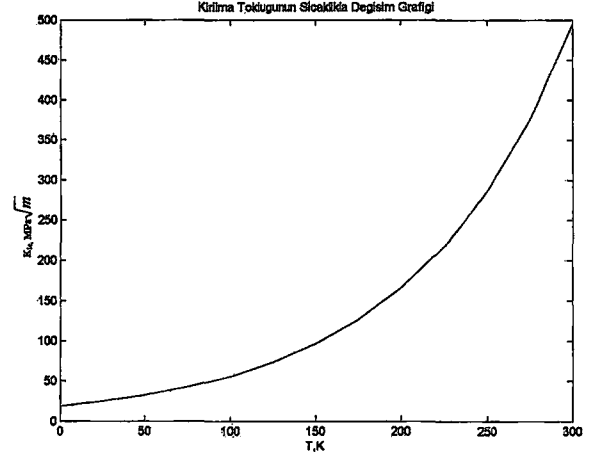
$$S_{fr} = 717,0875$$

$$T^* = 201,0424$$

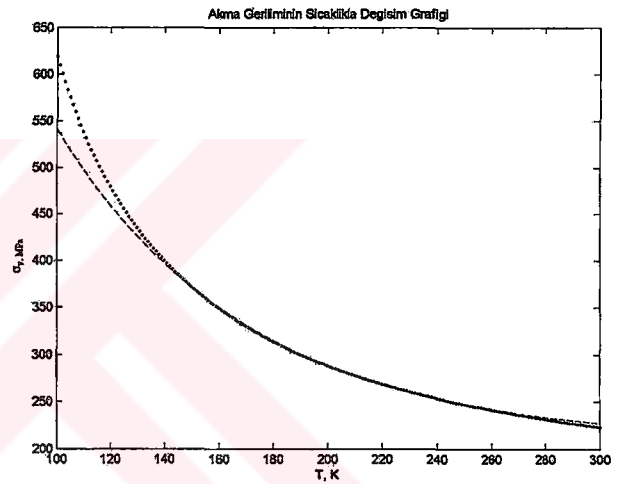
$$K_{1c}^0 = 18,7078$$

$$\kappa = 1,3821$$

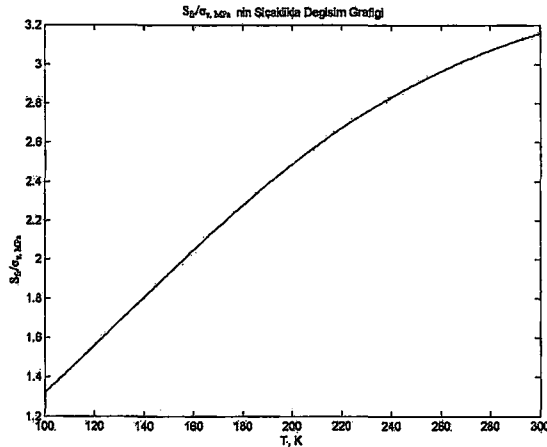
$$K_{1c} = 458,1878$$



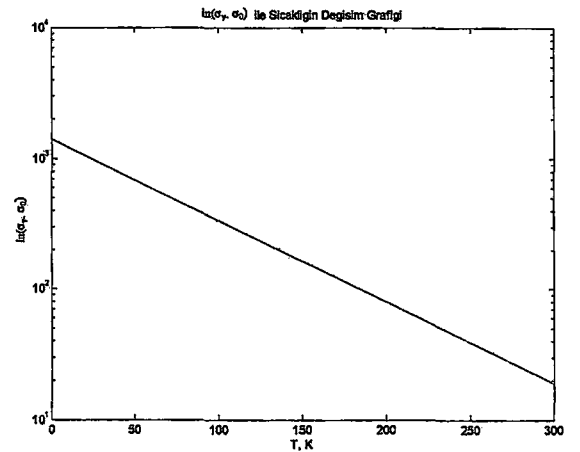
Şekil 26.2 Kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 26.3 Akma geriliminin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 26.1 S_{fr}/σ_y 'nin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 26.4 $\ln(\sigma_y - \sigma_0)$ ile sıcaklığın değişim grafiği

27. AISI 1016 1300 C/2,5 Saat Tam Tavlama (1)

S_{kop} (kopma ger.).....:882,602
 σ_{y0} (akma ger.).....:240,327
 β_y:148
 d_{ort}:71,860
 P_i Birinci Gerilim.....:289,546
 P_i Beşinci Gerilim.....:378,436
 Δ:0,500
 l_0:60,2

$$n = 0,1884$$

$$\sigma_0 = 221,8544$$

$$\alpha = 0,0141$$

$$A_{ort} = 1,3571e+003$$

$$T^* = 80,7460$$

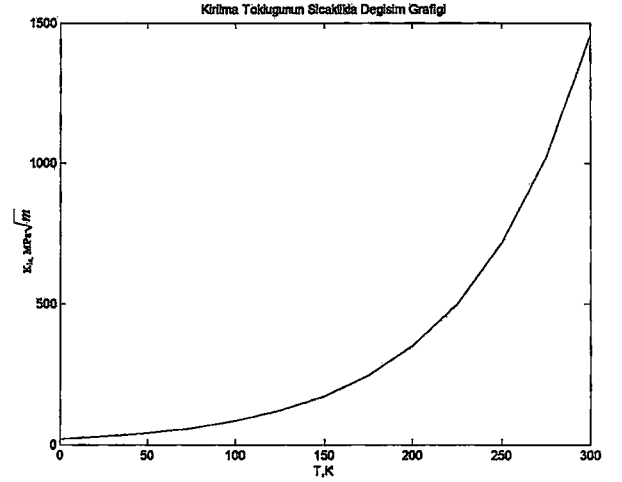
$$S_{fr} = 656,0073$$

$$T^* = 248,7243$$

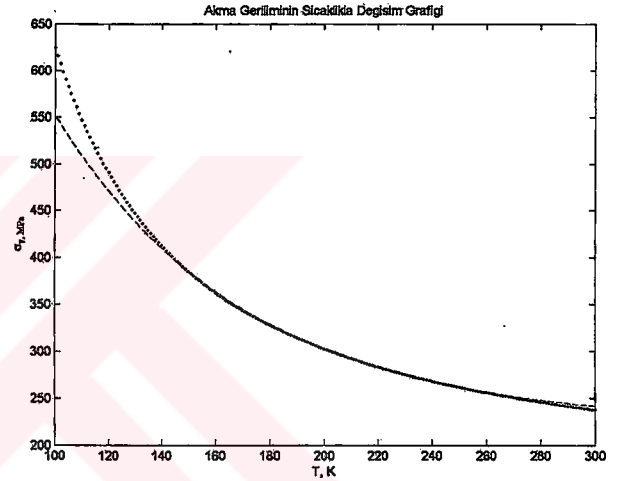
$$K_{Ic}^0 = 20,3899$$

$$\kappa = 2,1539$$

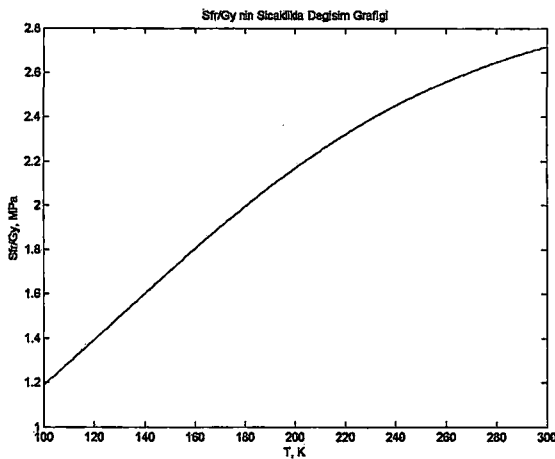
$$K_{Ic} = 1318,7$$



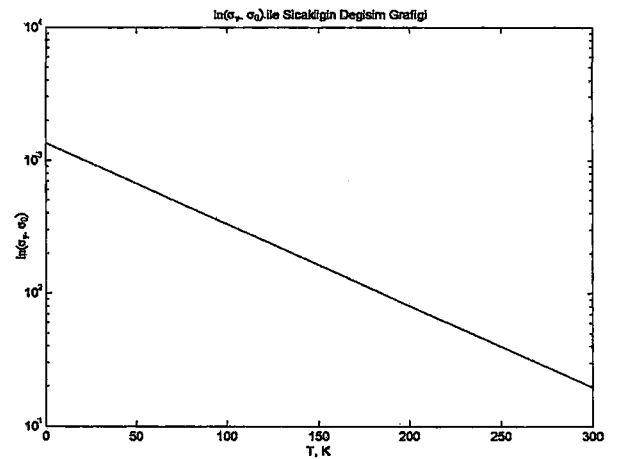
Şekil 27.2 Kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 27.3 Akma geriliminin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 27.1 S_0/σ_y 'nin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 27.4 $\ln(\sigma_y - \sigma_0)$ ile sıcaklığın değişim grafiği

28. AISI 1016 1300 C/2,5 Saat Tam Tavlama (2)

S_{kop} (kopma ger.).....:861,610
 σ_{y0} (akma ger.).....:224,272
 β_y:153,5
 d_{ort}:76,111
 P_i Birinci Gerilim.....:299,089
 P_i Beşinci Gerilim.....:395,754
 Δ:0,900
 l_0:61,25

$$n = 0,2127$$

$$\sigma_0 = 206,5956$$

$$\alpha = 0,0143$$

$$A_{ort} = 1,4014e+003$$

$$T^* = 82,0929$$

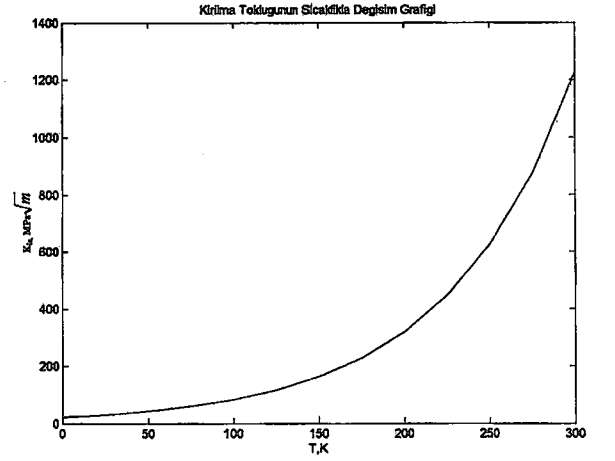
$$S_{fr} = 638,2461$$

$$T^* = 234,1961$$

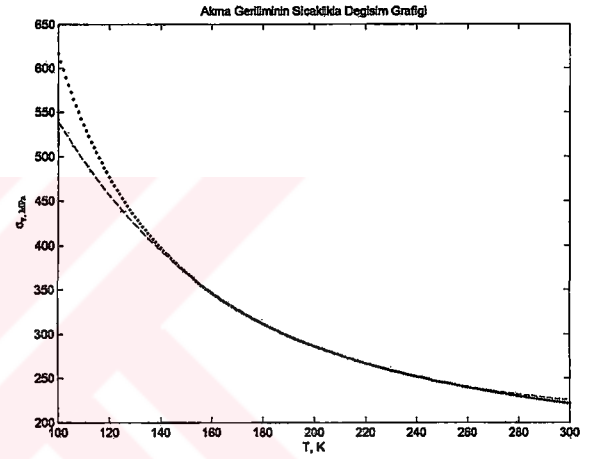
$$K_{1c}^0 = 21,6698$$

$$\kappa = 1,8503$$

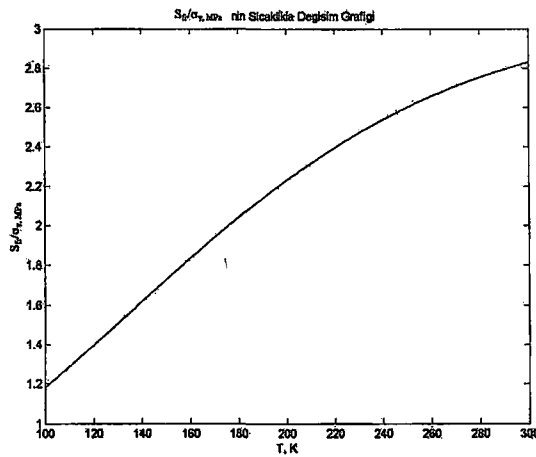
$$K_{1c} = 1116,1$$



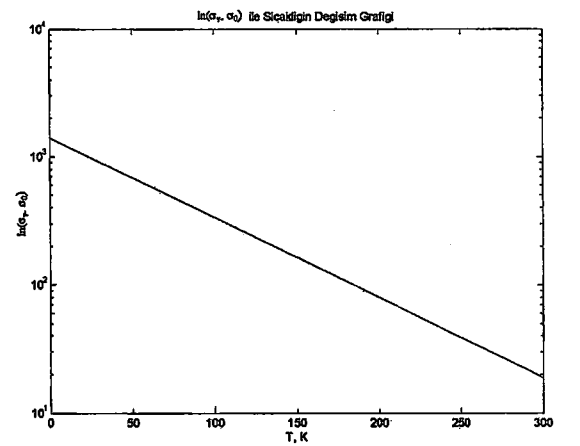
Şekil 28.2 Kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 28.3 Akma geriliminin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 28.1 S_{fr}/σ_y 'nin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 28.4 $\ln(\sigma_y - \sigma_0)$ ile sıcaklığın değişim grafiği

29. AISI 1016 1300 C/2,5 Saat Tam Tavlama (3)

S_{kop} (kopma ger.).....:832,211
 σ_{y0} (akma ger.).....:221,330
 β_y:154
 d_{ort}:75,182
 Pi Birinci Gerilim.....:234,367
 Pi Beşinci Gerilim.....:317,816
 Δ:0,500
 l_0:60,55

$n = 0,2114$

$\sigma_0 = 203,8616$

$\alpha = 0,0144$

$A_{ort} = 1,3911e+003$

$T^* = 83,2420$

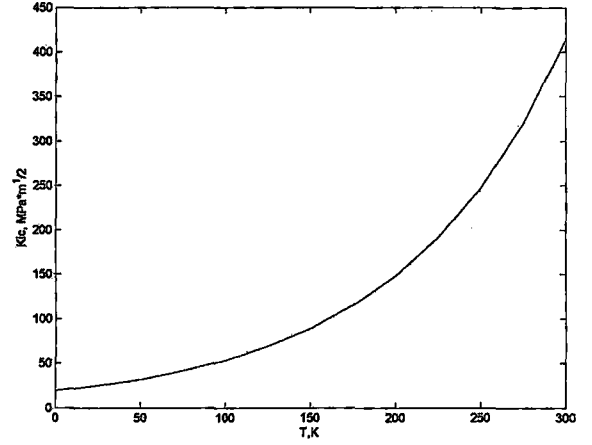
$S_{fi} = 624,8759$

$T^* = 237,3061$

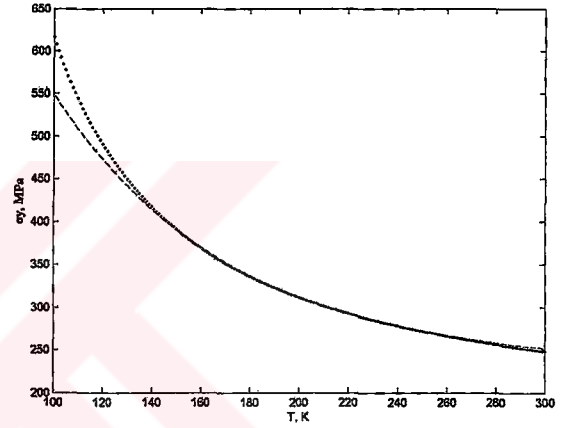
$K_{ic}^0 = 21,3798$

$\kappa = 1,8651$

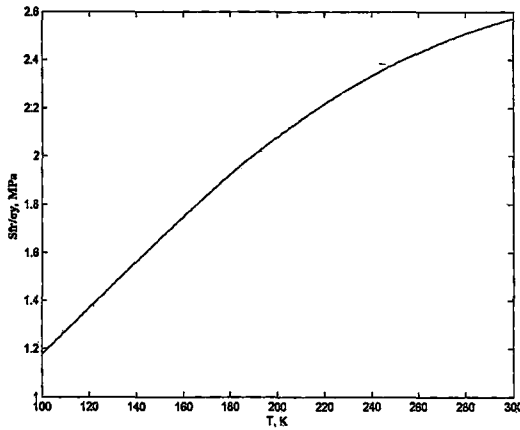
$K_{i,c} = 1113,9$



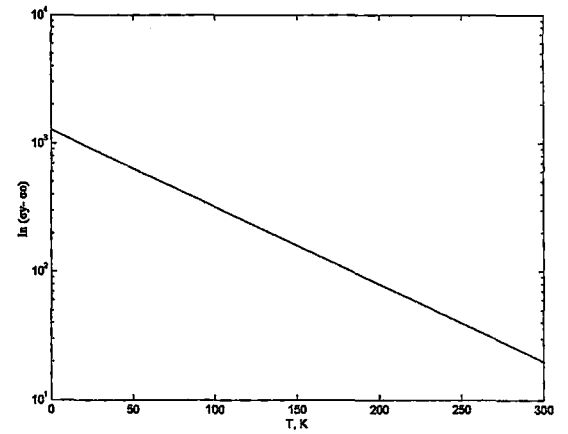
Şekil 29.2 Kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 29.3 Akma geriliminin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 29.1 S_{fi}/σ_y 'nin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 29.4 $\ln(\sigma_y \cdot \sigma_0)$ ile sıcaklığın değişim grafiği