

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Düşük Karbon Çelik ve Paslı Çelik,
Rakristalizasyon Uyg.

Yüksek Lisans Tezi

T. Soydan Keleş

1991

YILDIZ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



DÜŞÜK KARBONLU ÇELİKLERDE VE PASLANMAZ
ÇELİKLERDE REKRİSTALİZASYON UYGULAMALARI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MET.MÜH. T.SOYDAN KENEŞ

İSTANBUL, 1991

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
KÜTÜPHANE DOKÜMANTASYON
DAİRE BAŞKANLIĞI

Kot : R 370
Alındığı Yer : 3
Tarih : Y.T.Ü.
Fatura : 13.9.1995
Fiyatı : -
Ayniyat No : 300.000 TL.
Kayıt No : 1-15
UDC : 51669
Ek :

Y.T.Ü.

KÜTÜPHANE DOK. DAİ. BAŞKANLIĞI

İÇİNDEKİLER

YILDIZ ÜNİVERSİTESİ

YILDIZ ÜNİVERSİTESİ

D.B. No 50902

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SAYFA 10

1. Giriş	1
2. Rekristalizasyon	2
2.1. Rekristalizasyon Sıcaklığı	6
2.2. Rekristalizasyonda Zaman Ve Sıcaklığın Etkisi	6
2.3. Rekristalizasyonda Gerininin Etkisi	6
2.4. Çekirdeklenme Hızı ve Çekirdeğin Gelişme Hızı	17
2.5. Çekirdeklerin Oluşumu	18
2.6. Tane Büyüme Dağılımı - Şekillenebilirlik İlişkisi	19
2.7. Rekristalizasyon Tane Boyutu	21
2.8. Rekristalizasyonda Diğer Etkenler	25
2.8.1. Metalin Saflığı	25
2.8.2. Başlangıç Tane Büyüklüğü	30
3. Paslanmaz Çeliklerde Dinamik Rekristalizasyon	36
3.1. Ferritik Paslanmaz Çeliklerde Dinamik Rekristalizasyon	36
3.2. 18 - 8 Östenitik Paslanmaz Çeliklerde Dinamik Rekristalizasyon	44
3.2.1. Östenitin Dinamik Rekristalizasyonu	44
3.2.2. Deformasyon Koşulları (T, $\dot{\epsilon}$ ve ϵ) Ve Başlangıç Östenit Tane Büyüklüğünün (D_0) Etkisi	46
3.2.3. Deformasyon Koşulları (T, $\dot{\epsilon}$ ve ϵ) Ve Başlangıç Tane Büyüklüğünün Östenitin Dinamik Rekristalizasyon Olmuş Tane Büyüklüğü Üzerindeki Etkisi	50

DÜŞÜK KARBONLU ÇELİKLERDE VE PASLANMAZ

ÇELİKLERDE REKRİSTALİZASYON UYGULAMALARI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MET.MÜH. T.SOYDAN KENEŞ

İSTANBUL, 1991

İÇİNDEKİLER

3.2.3. Dinamik Rekristalize Olmuş Yapının Oda Sıcaklığındaki

Özet

Abstract

SAYFA NO

1. Giriş	1
2. Rekristalizasyon	2
2.1. Rekristalizasyon Sıcaklığı	6
2.2. Rekristalizasyonda Zaman Ve Sıcaklığın Etkisi	6
2.3. Rekristalizasyonda Gerininin Etkisi	6
2.4. Çekirdeklenme Hızı ve Çekirdeğin Gelişme Hızı	17
2.5. Çekirdeklerin Oluşumu	18
2.6. Tane Yönlenme Dağılımı - Şekillenebilirlik İlişkisi	19
2.7. Rekristalize Tane Boyutu	21
2.8. Rekristalizasyonda Diğer Etkenler	25
2.8.1. Metalin Saflığı	25
2.8.2. Başlangıç Tane Büyüklüğü ve Isıtma Hızı	30
3. Paslanmaz Çeliklerde Dinamik Rekristalizasyon	36
3.1. Ferritik Paslanmaz Çelikte Dinamik Rekristalizasyon	36
3.2. 18 - 8 Östenitik Paslanmaz Çeliğinde Dinamik Rekristalizasyon	44
3.2.1. Östenitin Dinamik Rekristalizasyon Davranışı Üzerinde Deformasyon Koşulları (T , $\dot{\epsilon}$ ve ϵ) Ve Başlangıç Östenit Tane Büyüklüğünün (D_0) Etkisi	46
3.2.2. Deformasyon Koşulları (T , $\dot{\epsilon}$ ve ϵ) Ve Başlangıç Tane Büyüklüğünün Östenitin Dinamik Rekristalize Olmuş Tane Büyüklüğü Üzerindeki Etkisi	50

ÖZET

3.2.3. Dinamik Rekristalize Olmuş Yapının Oda Sıcaklığındaki Sertliği	52
3.2.4. Östenitin Dinamik Rekristalizasyon Oluşumu İçin Deformasyon Şartları	52
3.2.5. Dinamik Rekristalizasyon Sonucu Östenit Tane Büyüklüğü İncelmesi.	52
3.2.6. Dinamik Rekristalizasyonun Dayanım Artırma Etkisi	54
4. Deneysel Çalışmalar	56
4.1. Malzemeler Ve Deneysel Süreç	56
4.2. Bulgular	56
4.3. Tartışma Ve Sonuç	62
5. Sonuç	77
Kaynakça	
Özgeçmiş	

ÖZET

Belirli bir derecenin üzerinde soğuk şekillendirmeye uğramış çeliklerin, faz dönüşümü olmayacak şekilde ısıtılması sonucunda, iç yapıda tanelerin yeniden düzenlenmesi mümkündür. Bu düzenleme sonucunda malzemedeki deformasyon etkileri kısmen ya da tamamen yok edilebilmektedir ve özellikler başlangıçtaki durumuna yaklaşabilmektedir.

Rekristalizasyon işlemi, soğuk şekillendirilmiş çeliklerin sonradan tavlama ile oluşabildiği gibi, rekristalizasyon sıcaklığının üzerinde şekillendirme ile de oluşabilmektedir.

Deformasyon miktarı, işlem sıcaklığı ve süresi, metalin saflığı, başlangıçtaki tane büyüklüğü, ısıtma hızı, tane yönelme dağılımı, dinamik rekristalizasyondaki gerinim hızı gibi rekristalizasyon presesini etkileyen faktörler bu çalışmada ele alınmıştır. Ferritik ve östenitik paslanmaz çeliklerde dinamik rekristalizasyon olayı açıklanmaya çalışılmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalarla düşük karbonlu çelik tellerde rekristalizasyon olayı üzerinde soğuk şekillendirme derecesi, işlem sıcaklığı ve süresinin etkisi incelenmiştir.

ABSTRACT

When a steel having certain amount of deformation is annealed that the material does not undergo a phase transition, it is possible to rearrangement of microstructure. As a result of this rearrangement, the effects of deformation are locally and completely eliminated and the properties approach their initial values.

Recrystallization process can occur by subsequent annealing of cold-worked steels or by deformation above recrystallization temperature.

Factors effecting recrystallization procedure (degree of deformation, time and temperature of process, purity of metal, initial grain size, heating rate, grain orientation and distribution, strain rate of dynamic recrystallization, etc.) are discussed. Dynamic recrystallization of ferritic and austenitic stainless steels are tried to be explained.

Effects of degree of deformation, process temperature and time at temperature on the material properties in the low carbon steel wires are studied by experimental means.

1. GİRİŞ

2. REKRİSTALİZASYON

Soğuk şekillendirme işlemi metalde belirli bir sertleştirme etkisi yapar ve taneleri çekme doğrultusunda uzatır. Metalin sertleşmesi, ilave şekillendirme için gerekli olan enerji miktarını artırır, giderek, ilave pasonun malzemenin taneleri arasında kırılmaya yol açacağı bir duruma gelişebilir.

Belirli bir derecede soğuk şekillendirilmiş bir metal ısıtıldığı zaman, belirli bir sıcaklıkta ve belirli bir süre içinde, deforme olmuş tanelerin form ve düzenleri değiştirilebilir. Bu değişim sonucunda, işlem sıcaklığı ve süresine bağlı olarak, ortaya çıkan yeni yapıda başlangıçta- kinden daha büyük taneler ya da ince ve eş eksenli taneler görülebilir. Oluşan yapı bazı malzeme özellikleri tarafından da etkilenir. Şekillendirme işleminin rekristalizasyon sıcaklığının üzerinde yapıldığı durumlarda, sözü edilen yapı değişimleri şekillendirme işlemi sırasında da meydana gelebilir.

Düşük karbonlu çelikler ve paslanmaz çelikler endüstride yaygın olarak, özellikle tel ve levha halinde, soğuk ya da sıcak şekillendirilerek ürün haline getirilirler. Bu malzemelerde derin çekme uygulamaları da oldukça fazladır. Bu uygulamalarda belirli işlem kademelerinde, şekillendirmeye uygun bir biçimde devam edebilmek için ya da nihai ürüne bazı özellikler kazandırmak için, bir tavlama işlemi yapılmaktadır. Bu tavlama işlemine rekristalizasyon tavlaması ya da proses tavlaması adı verilmektedir.

Çoğunlukla üretim işleminde bir ara uygulama olan rekristalizasyon tavlaması uygun koşullarda yapılmadığı takdirde malzemenin üretim şartları ve teknolojik özellikleri olumsuz yönde etkilenmektedir.

2. REKRİSTALİZASYON

Soğuk şekillendirilmiş bir malzeme, artırılmış fiziksel hata miktarının bir sonucu olarak, termodinamik açıdan stabil olmayan bir durumdadır. Sıcaklık yükseltildiğinde kafes hatalarının indirgenmesi ve yeniden düzenlenmesi yoluyla malzemenin serbest enerjisi (Gibbs free energy) azalabilir. Sistematik bir sınıflandırma için, ergime noktasının altında ortaya çıkan beş temel prosesle tanımlama yapılabilir. Saf bir metali denge durumuna yaklaştıracak bu temel prosesler şunlardır :

1. Nokta hatalarının ve nokta hatası yığılmalarının reaksiyonları; özellikle bu hataların yok edilmesi.
2. Karşıt dislokasyonların yok olması ve dislokasyon luplarının bütülmesi.
3. Dislokasyonların enerjisel olarak daha tercihli konfigürasyonlar oluşturacak şekilde yeniden düzenlenmesi.
4. Metalin tamamında tane sınırı göçü (grain boundary migrating) tarafından nokta hatalarının ve dislokasyonların absorpsiyonu.
5. Toplam tane sınırı alanında azalma.

Şekillendirilmiş polikristalin bir metal, çoğunlukta, tek bir proses ile termodinamik olarak daha stabil bir konuma ulaşamaz. Bunun yerine yukardaki tüm reaksiyonlar kısmi ve zamansal olarak sırayla veya aynı anda ilerler.

Kollektif bir tanımlamada 1 ve 2 prosesleri toparlanma, 4 ve 5 prosesleri rekristalizasyon (geniş - açılı sınırlarının göçü) olarak adlandırılmaktadır. Eğer 3 ara prosesi geniş - açılı sınırlarının oluşumuna yardım ederse, rekristalizasyonun bir parçası olarak düşünülebilir. Dislokasyonların küçük - açılı sınırları oluşturmaya (subgrain formation) yol açacak şekilde yeniden düzenlenmesi bazen poligonizasyon olarak adlandırılmaktadır. Diğer bir deyişle, oldukça genel bir tanımlamayla rekristalizasyon, geniş - açılı sınırlarının oluşması ve göçüdür. (Bazı rekristalizasyon prosesleri ise çekirdeklenme, yani geniş açılı sınırı oluşumu olmaksızın meydana gelir.) Şimdiye kadar, stabil olmayan durumun tavlama öncesi oluşturulduğunu kabul ettik. Eğer, bu durum tav-

lama sırasında oluşturulmuşsa, örneğin yeterli yüksek sıcaklıkta plastik şekillendirme ile, o zaman dinamik toparlanma ya da dinamik rekristalizasyon söz konusu olur.

Böyle komplike koşullar altında ortaya çıkan prosesler henüz tam anlaşılamamıştır, temel prosesler çevresinde bir sistematik sınıflandırma olası değildir. (9)

Bir üst kavram olarak rekristalizasyon terimi, yapıların ısı işleminde görülebilir değişmelerin, faz dönüşmesi olmaksızın meydana gelmesini anlatır. Alt kavram olarak ise, literatürlerde şu kavramlar verilmektedir: (10)

Primer rekristalizasyon

Genel tane büyümesi

Sekonder rekristalizasyon

Tertier rekristalizasyon

Gerilim etkili tane sınırı değişmesi

Situ içerisindeki rekristalizasyon

Primer rekristalizasyon, yeterince soğuk şekillendirilmiş bir metalin tavlanması pratikteki en önemli durumdur. Soğuk şekillenmiş matrisin tercihli yerlerinde çekirdek oluşumu ile, yapıdaki şekillenmiş kristalleri yeniden form verecek şekilde yok ederek, çekirdeklerin gelişmesi sonucu, yeni taneler ortaya çıkar. Bu sırada, soğuk plastik deformasyonda oluşan dislokasyonlar da önemli ölçüde azalır. Onların enerjisi, devam eden reaksiyon için itici kuvveti oluşturur. Çekirdek, en azından bir yönde gelişme yeteneğine sahip bir kafes bölgesidir. Bu bölgenin kafes hataları yoğunluğu, özellikle dislokasyonlar, deforme olmuş matristen daha azdır. Böyle bir çekirdek çevresinden yeni oluşmuş geniş açılı sınırı ile ayrılır. Başka bir anlatımla primer rekristalizasyonda tanelerin çekirdeklenmesi ve birincil gelişmesi, dislokasyonların enerjisel olarak daha tercihli bir konfigürasyon oluşturacak şekilde yeniden düzenlenmesi⁽⁺⁾ ve tane sınırı hareketi mekanizması ile dislokasyonların ve nokta hatalarının absorpsiyonu süreçleri ile olur. Tanelerin birincil gelişmesi için itici kuvvet, esasen, çekirdek ve matris arasındaki dislokasyon yoğunluğu farkıdır. Çok şiddetli ya

da çok zayıf soğuk şekillendirme sonrasında primer rekristalizasyonun normal durumundan sapmalar gözlenilebilmektedir. (9,10)

Yüksek deformasyondan sonra, tavlama sırasında bazan diskolasyonlar şu şekilde yeniden düzenlenir : Büyük açılı tane sınırları ile bölünmüş düşük dislokasyon yoğunluklu küçük bölgeler her yerde oluşmuştur. Böylece yeni yapı büyük açılı sınırı göçü olmadan oluşur. Dolayısıyla, malzemenin yapısı esasen aynı kalır. Bu proses SİTU İÇERİSİNDE REKRİSTALİZASYON olarak adlandırılır. Yapısal, atomistik anlamda bu davranış 3 nolu prosese tekabül eder. Yani dislokasyonların enerjisel olarak daha tercihli bir konfigürasyon oluşturacak şekilde yeniden düzenlenmesi.

Primer rekristalizasyon oluşmasına yetmeyecek kadar zayıf deformasyondan sonra, tavlamanın başından itibaren mevcut geniş açılı sınırları arkasında daha az hatalı bir bölge bırakacak şekilde yer değiştirilebilir. Bu proses GERİNİM ETKİLİ TANE SINIRI GÖÇÜ olarak adlandırılır ve 4 nolu prosese tekabül eder. Yani, tane sınırı göçü mekanizması ile dislokasyonların ve nokta hatalarının absorpsiyonu.

Primer rekristalizasyonun kinetiği (eşisıl bir deneyde) rekristalize olmuş hacim kısmı $X(t)$ (t :zaman) ile tanımlanabilir. İlk kuluçka devresinden sonra eşisıl tavlama zamanı artırılırken bu hacim kısmı sigmoidal olarak artar. Rekristalize olmuş kısmın zaman bağıntısı sıklıkla bir Avrami bağıntısıyla tanımlanabilmektedir : $x(t) = 1 - \exp(-At^K)$. A ve K sabitlerdir.(9)

Primer rekristalizasyon tamamlandıktan sonra tavlamaya devam edilirse, rekristalize olmuş yapıda tane sınırı göçü devam eder, bunun sonucu olarak ortalama tane çapı büyür. Bu proses "tane büyümesi" terimiyle özetlenebilir. Yapısal, atomistik anlamda bu durum 5 no.lu prosese tekabül eder. Yani, toplam tane sınırının azalması. Normal, veya sürekli tane büyümesinde tane büyüklüğü ve/veya biçimi hemen hemen sabit kalır. Bazı tanelerin daha hızlı büyümesi sonucunda ortaya çıkan süreksiz tane büyümesinde topolojik parametreler sabit değildir. Süreksiz tane büyümesinde az sayıda tane diğerlerini yok edecek şekilde büyüdüğünden dolayı, bu durum primer rekristalizasyonun dış

görünüşüne oldukça benzetilir, bundan dolayı çoğunlukla sekonder rekristalizasyon olarak bilinir.

Ortalama tane çapı numune boyutlarına göre uygun bir değere eriştiğinde, normal tane büyümesi, çoğunlukla, tane sınırlarının yüzeyde thermal grooving tarafından engellenmesiyle, durdurulur. Bu engelleme etkisinin küçük olduğu istisnai durumlarda, yüzeyde tane sınırlarının göç etmesi gözlenilebilir. Buna neden olan itici kuvvet farklı yönlenmelerdeki tanelerin yüzey enerjilerinin farklılığıdır. Bu proses tertier rekristalizasyon olarak adlandırılır.(9)

Bu çalışmada bundan sonraki kısımda "primer rekristalizasyon" terimi yerine pratikte ve literatürde çoğunlukla kullanıldığı gibi, yalnızca "rekristalizasyon" terimi kullanılacaktır.

İşlem sıcaklığı yükseldikçe rekristalizasyonun bitmesi için gerekli zaman kısalar. Bu durum şekil 2'de görülmektedir. (2) Sıcaklığın 10°C kadar düşmesi rekristalizasyonun tamamlanmasını oldukça uzatacaktır. yani düşük bir sıcaklıkta malzeme kısmen rekristalize olacaktır. Sıcaklığın artması ise olayın süresini oldukça kısaltacaktır. Sıcaklıkteki küçük değişikliklere karşı bu duyarlılık, belli bir sıcaklığın altında rekristalizasyonun olmaması nedeniyle rekristalizasyon sıcaklığının belirli bir değeri olarak algılanması sonucunu doğurmuş ve zaman faktörünün ihmaline neden olmuştur.

İşlem sıcaklığı yükseldikçe rekristalizasyonun bitmesi için gerekli zaman kısalar. Bu durum şekil 2'de görülmektedir. (2) Sıcaklığın 10°C kadar düşmesi rekristalizasyonun tamamlanmasını oldukça uzatacaktır. yani düşük bir sıcaklıkta malzeme kısmen rekristalize olacaktır. Sıcaklığın artması ise olayın süresini oldukça kısaltacaktır. Sıcaklıkteki küçük değişikliklere karşı bu duyarlılık, belli bir sıcaklığın altında rekristalizasyonun olmaması nedeniyle rekristalizasyon sıcaklığının belirli bir değeri olarak algılanması sonucunu doğurmuş ve zaman faktörünün ihmaline neden olmuştur.

2.3. REKRİSTALİZASYONDA GERİNİMİN ETKİSİ

Sofuk şekillendirme derecesi büyüdükçe malzemede daha fazla bozulum meydana gelir ve daha fazla iç enerji bırakılır. Bu da rekristalizasyonun başlangıç sıcaklığını azaltır. (1) Deformasyon derecesinin bu etkiyi etkiler için şekil 3'te verilmiştir. Aynı sıcaklıkta tavlama şekli değişim dereceleri farklı iki malzemeden, daha büyük şekillendirme derecesine sahip olan malzeme daha kısa zamanda rekristalize olur. Şekil 4'ten görüldüğü gibi, rekristalizasyon sıcaklığı başlangıç şekillendirilmesinin miktarı ile değişir, ya da, rekristalizasyon için

2.1. REKRİSTALİZASYON SICAKLIĞI

Rekristalizasyon sıcaklığı terimi, daha aşağısında rekristalizasyon olmayacak belirli bir sıcaklığı ifade etmez, fakat yüksek oranda soğuk şekillendirilmiş bir malzemenin bir saat içinde tamamen rekristalize olacağı bir sıcaklığı gösterir. Bu sıcaklık ergime noktası gibi sabit bir fiziksel nicelik değildir. Herhangi bir metal için bu sıcaklık, metalin ısıtıldığı zamanın uzunluğuna, önceki deformasyon derecesine ve diğer faktörlere bağlıdır. (1,2,3,4.)

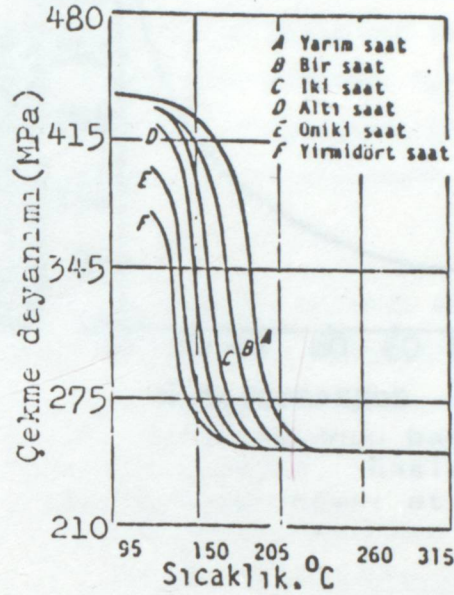
2.2. REKRİSTALİZASYONDA ZAMAN VE SICAKLIĞIN ETKİSİ

Tavlama süresinin artmasıyla rekristalizasyon sıcaklığı azalır. Ancak rekristalizasyon işlemi sabit sıcaklıktaki bekleme zamanındaki değişikliklerden daha çok, işlem sıcaklığındaki değişikliklere karşı duyarlıdır. (1). Şekil 1, bu etkiyi göstermektedir.

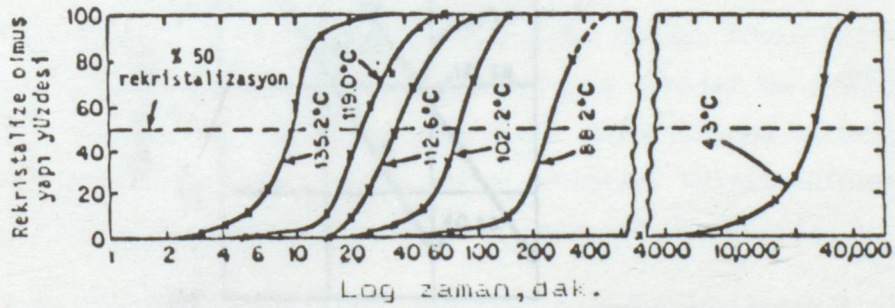
İşlem sıcaklığı yükseldikçe rekristalizasyonun bitmesi için gerekli zaman kısalır. Bu durum şekil 2'de görülmektedir. (2) Sıcaklığın 10°C kadar düşmesi rekristalizasyonun tamamlanmasını oldukça uzatacaktır. Yani düşük bir sıcaklıkta malzeme kısmen rekristalize olacaktır. Sıcaklığın artması ise olayın süresini oldukça kısaltacaktır. Sıcaklıktaki küçük değişikliklere karşı bu duyarlılık, belli bir sıcaklığın altında rekristalizasyonun olmaması nedeniyle rekristalizasyon sıcaklığının metalin bir özelliği olarak algılanması sonucunu doğurmuş ve zaman faktörünün ihmeline neden olmuştur.

2.3. REKRİSTALİZASYONDA GERİNİMİN ETKİSİ

Soğuk şekillendirme derecesi büyüdükçe malzemede daha fazla bozunum yaratılır ve daha fazla iç enerji bırakılır. Bu da rekristalizasyonun başlama sıcaklığını azaltır. (1) Deformasyon derecesinin bu etkisi bakır için şekil 3'te verilmiştir. Aynı sıcaklıkta tavlanan şekil değiştirme dereceleri farklı iki malzemedен, daha büyük şekillendirme derecesine sahip olan malzeme daha kısa zamanda rekristalize olur. Şekil 4'ten görüleceği gibi, rekristalizasyon sıcaklığı bağımlılığı şekillendirmenin miktarı ile değişir, ya da, rekristalizasyon için



Şek.1. Tavlama da zaman ve sıcaklığın etkisi. (Soğuk şekillendirilmiş Cu için)

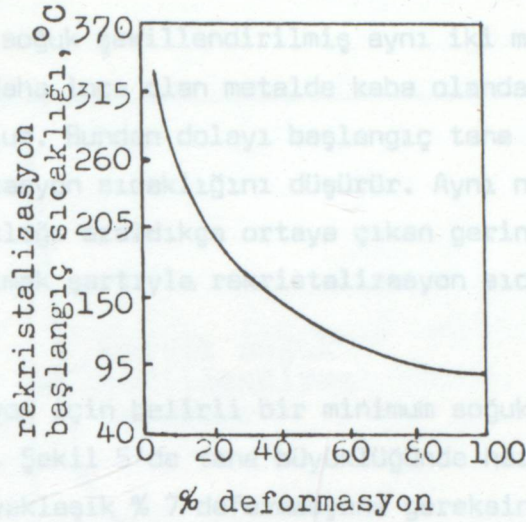


Şek.2. % 99.999 soğuk haddelenmiş saf Cu (% 99.999 Cu) için eşitli rekristalizasyon eğrileri .

gerekli aktivasyon enerjisi deformasyon miktarının fonksiyonudur. (2)

Eğit miktarında başlangıçta ilandirilmiş aynı iki metalden başlangıç tane büyüklüğü dolayısıyla başlangıç tane büyüklüğünün incalması rekristalizasyon sıcaklığına bağlıdır. Aynı nedenle soğuk şekillendirme sıcaklığı ortaya çıkan gerinin miktarı artar, ve aynı soğuk şekillendirme sıcaklığı rekristalizasyon sıcaklığı etkin biçimde azalır. (3)

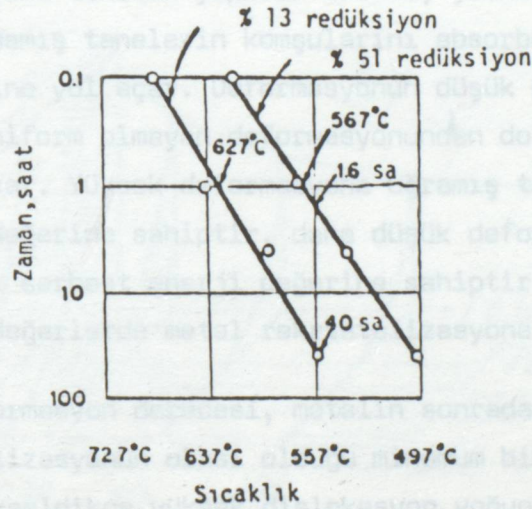
Rekristalizasyon sıcaklığı belirli bir minimum soğuk şekillendirme miktarı gereklidir. Şekil 3. Deformasyonun bakırın rekristalizasyon başlangıç sıcaklığı üzerindeki etkisi. (1)



Sek.3. Deformasyonun bakırın rekristalizasyon başlangıç sıcaklığı üzerindeki etkisi.

% 3-15 arasındaki deformasyon derecelerinde tavlamayı takiben çok hızlı tane büyümesi olur ve çoğu zaman başlangıçtaki tanelerden daha büyük olurlar. Buna kritik deformasyon denir. Bir metale kritik deformasyon uygulandıktan sonra yeni tanelerin oluşması ve sonraki gelişmeleri mekanizması ile rekristalizasyon ilerlemesiz. (3)

Kritik deformasyonu takiben yapılan ısıtma, yalnızca başlangıçtaki rekristalizasyon olmayan tanelerin büyümesini hızlandırmak suretiyle hızlı büyümelere sebep olur. Bu nedenle düşük derecelerde değişik tanelerin oluşması dolayısıyla böyle bir mekanizma ortaya çıkmaz. Soğuk şekillendirme sıcaklığı düşük deformasyona uğramış taneler daha düşük sıcaklıklarda rekristalizasyon gösterir. Kritik deformasyon üzerindeki deformasyon miktarı rekristalizasyon sıcaklığına bağlıdır. (3)



Yeni kritik deformasyon miktarı, metalin sonradan yapılacak tavlaması ile rekristalizasyon sıcaklığına bağlıdır. Deformasyon derecesi yükseldikçe, yeni kritik deformasyon yoğunluklu bölge sayısı da artar ve rekristalizasyon sıcaklığı da düşer. Yüksek deformasyon derecesi için rekristalizasyon sıcaklığı daha düşük olur. (3)

Sek.4. Zr da iki farklı deformasyon derecesi için rekristalizasyon zaman - sıcaklık ilişkisi. (1)

gerekli aktivasyon enerjisi deformasyon miktarının fonksiyonudur. (2)

Eşit miktarda soğuk şekillendirilmiş aynı iki metalden başlangıç tane büyüklüğü daha ince olan metalde kaba olandan daha fazla gerinim sertleşmesi olur. Bundan dolayı başlangıç tane büyüklüğünün incelmesi rekristalizasyon sıcaklığını düşürür. Aynı nedenle soğuk şekillendirme sıcaklığı azaldıkça ortaya çıkan gerinim miktarı artar, ve süre sabit kalmak şartıyla rekristalizasyon sıcaklığı etkin biçimde azalır. (1)

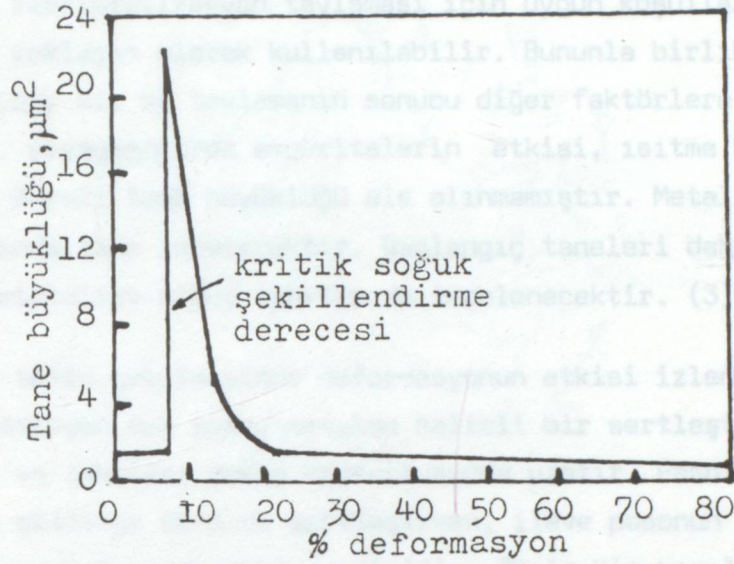
Rekristalizasyon için belirli bir minimum soğuk şekillendirme miktarı gereklidir. Şekil 5'de tane büyüklüğünde herhangi bir değişiklik olmadan önce yaklaşık % 7 deformasyona gereksinim olduğu görülmektedir. (1)

% 3-15 arasındaki deformasyon derecelerinde tavlamayı takiben çok hızlı tane büyümesi olur ve çoğu zaman başlangıçtaki tanelerden daha büyük olurlar. Buna kritik deformasyon denir. Bir metale kritik deformasyon uygulandığı zaman yeni tanelerin oluşması ve sonraki gelişmeleri mekanizması ile rekristalizasyon ilerlemez. (3)

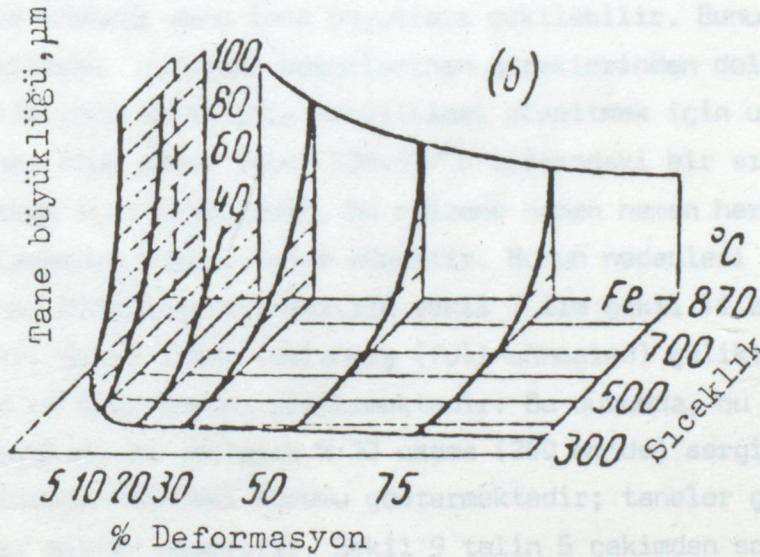
Kritik deformasyonu takiben yapılan ısıtma, yalnızca başlangıçtaki rekristalize olmamış tanelerin komşularını absorbe etmek suretiyle hızlı büyümelerine yol açar. Deformasyonun düşük derecelerinde değişik tanelerin üniform olmayan deformasyonundan dolayı böyle bir mekanizma ortaya çıkar. Yüksek deformasyona uğramış taneler daha yüksek serbest enerji değerine sahiptir, daha düşük deformasyona uğramış taneler daha düşük serbest enerji değerine sahiptir. Kritik deformasyonun üzerindeki değerlerde metal rekristalizasyona uğrar. (3)

Yani kritik deformasyon derecesi, metalin sonradan yapılacak tavlama ile rekristalizasyonun olası olduğu minimum bir değerdir. Deformasyon derecesi yükseldikçe yüksek dislokasyon yoğunluklu bölge sayısı da artar ve rekristalizasyon oluşum merkezleri çoğalır. Yüksek deformasyon derecelerinde rekristalize çekirdeklerin oluşum hızı büyüme hızlarını aşar. Bu da ince taneli yapı eldesine olanak tanır.





Sek.5. Düşük karbonlu bir çelikte soğuk şekillendirmenin $950^\circ C$ 'de tavlama sonrasında tane büyüklüğü üzerindeki etkisi.



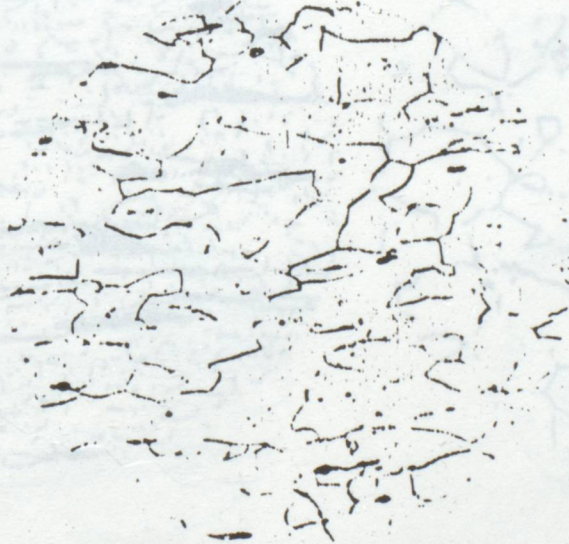
Sek.6. Demir için rekristalizasyon veya lifli bir yapı diyagramı.

Tane büyüklüğünün sıcaklık ve deformasyon derecesine bağlılığı şekil 6'da rekristalizasyon diyagramı şeklinde gösterilmiştir. Bu diyagramlar rekristalizasyon tavlama için uygun koşulları seçmek amacıyla ilk yaklaşım olarak kullanılabilir. Bununla birlikte, şu da belirtilmelidir ki, bu tavlamanın sonucu diğer faktörlere de oldukça bağlıdır. Diyagramlarda empüritelerin etkisi, ısıtma hızı ve deformasyondan önceki tane büyüklüğü ele alınmamıştır. Metal daha hızlı ısıtıldığında tane inceleyecektir. Başlangıç taneleri daha ince olduğunda rekristalize olmuş taneler de incelenecektir. (3)

Bir telin çekilmesinde deformasyonun etkisi izlenecek olursa birbirini izleyen her paso, metalde belirli bir sertleştirme etkisine sahiptir ve taneleri çekme doğrultusunda uzatır. Pasolar tekrarlanır ve tel gittikçe daha da sertleşirken, ilave pasonun telin kırılmasına yol açacağı bir noktaya erişilir. Böyle bir kırılma noktasına gelinmeden önce, hasara neden olmaksızın işleme devam edilmesine olanak tanıyan bir ısıtma işlemi yapmak zorunludur. Üretim işlemi içinde telleri yumuşatma için, çoğunlukla alt kritik sıcaklıklardaki proses tavlama uygulanır. Bu tavlama esas olarak sert çekilmiş düşük karbonlu tellerin sünekliğini iyileştirmek için proses boyutunda uygulanır ve böylece daha ince boyutlara çekilebilir. Bununla birlikte, bazı tellerde uygulama koşullarının gereklerinden dolayı bitmiş ürün boyutlarında da mekanik özellikleri düzeltmek için uygulanır. Bu sonuçları elde etmek için, 538-677°C arasındaki bir sıcaklık çeliği yumuşatmak için yeterlidir, bu malzeme hemen hemen herhangi bir paso uygulanmadan önceki kadar sünektir. Bunun nedenleri tellerin mikrograflarının karşılaştırılması ile şekil 7 ile şekil 11 arasında gösterilmiştir. Şekil 7 tam tavlama (full-annealed) çelikte tanelerin form düzen ve boyutlarını göstermektedir. Bu durumda, bu çelik 330 MPa çekme dayanımı ve yaklaşık % 33 uzama (250 mm'de) sergiler. Şekil 8 tek bir pasodan sonraki durumu göstermektedir; taneler çekme doğrultusunda bir miktar uzamıştır. Şekil 9 telin 5 çekimden sonraki yapısını göstermektedir. Tanelerin birbirinin içine geçmiş veya lifli bir yapı içerisinde uzatıldığı görülecektir. Bu yapı şekil 7'deki orjinal eşkenarlı tanelerden büyük oranda değişmiştir. Tel bu durumda 860 MPa'lık bir çekme dayanımına ve % 1 civarında bir uzamaya sahip olacaktır.



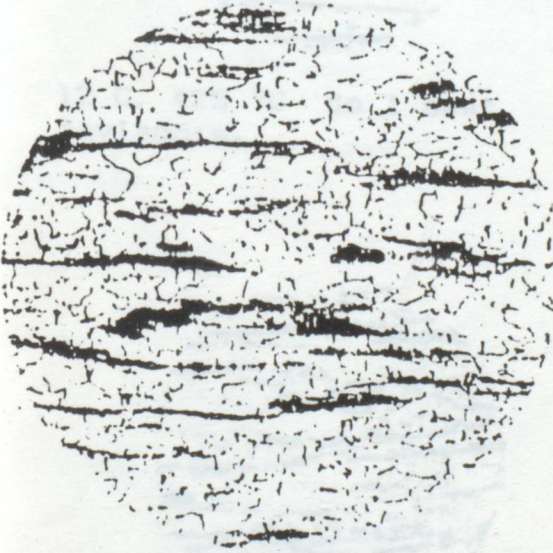
Sek.7. Tam tavllanmış % 0.06 C 'lu
çelik tel. (500 X)



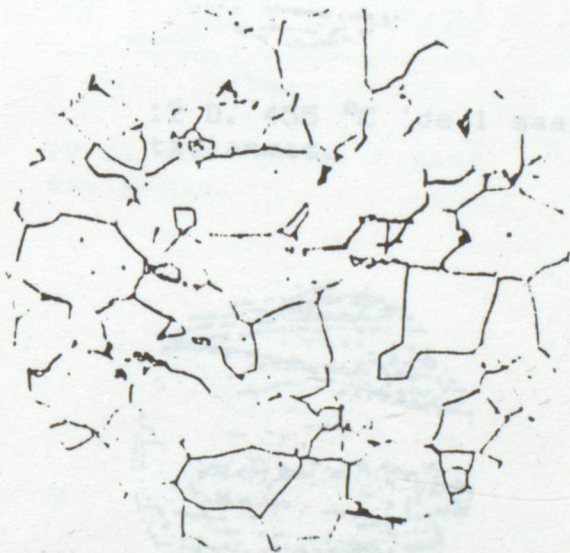
Sek.8. % 0.06 C 'lu çelik telin bir
çekimden sonraki yapısı. (500 X)



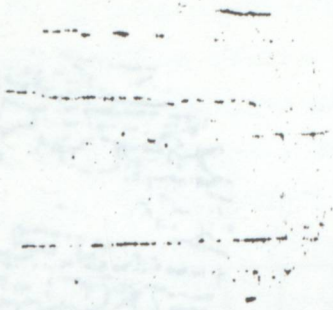
Sek.9. Sert çekilmiş % 0.16 C 'lu
çelik tel. (500 X)



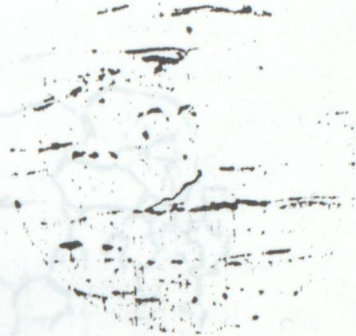
Sek.10. % 0.15 C 'lu çelik
telin kısa zaman periyodlu
alt - kritik tavlamasından
sonraki yapısı. (500 X)



Sek.11. Sert çekilmiş % 0.15
C 'lu çelik telin tam tavlama
sonrasındaki yapısı. (500 X)



2 A. Sert çekilmiş tel.



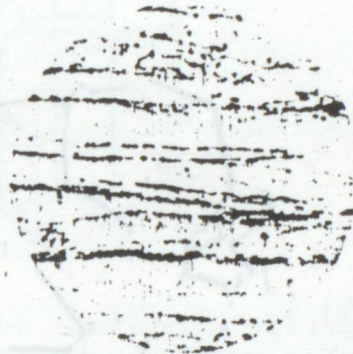
12 B. 315 °C 'de 1 saat tavllanmış.

12 G. 325 °C 'de 1 saat tavllanmış.

12 H. 540 °C 'de 1 saat tavllanmış.



12 C. 425 °C 'de 1 saat tavllanmış.



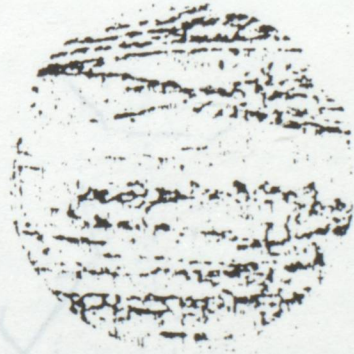
12 D. 455 °C 'de 1 saat tavllanmış.

12 I. 475 °C 'de 1 saat tavllanmış.

12 J. 485 °C 'de 1 saat tavllanmış.



12 E. 480 °C 'de 1 saat tavllanmış.



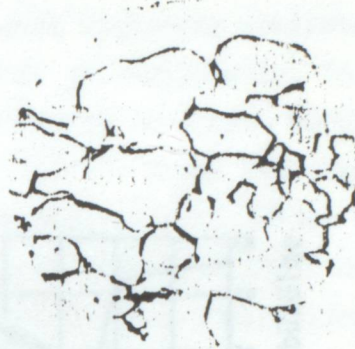
12 F. 510 °C 'de 1 saat tavllanmış.

12 G. 515 °C 'de 1 saat tavllanmış.

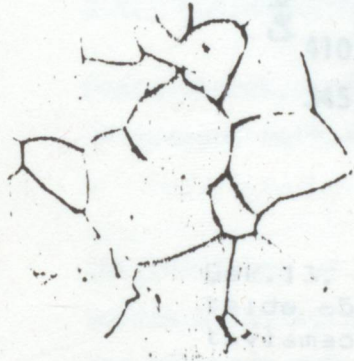
Sek. 12. Sert çekilmiş bir telin değişik sıcaklıklarda tavlamaından sonra mikroyapıdaki değişiklikleri gösteren foto-mikrograffar. (1000 X)



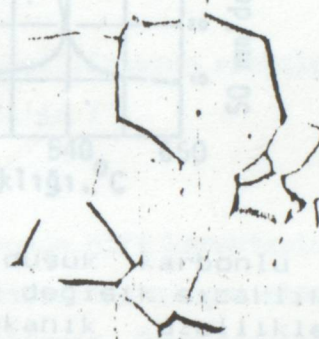
12 G. 525 °C 'de 1 saat
tavlanmış.



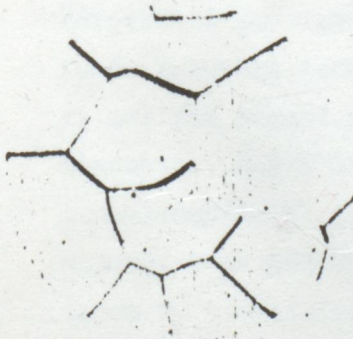
12 H. 540 °C 'de 1 saat
tavlanmış.



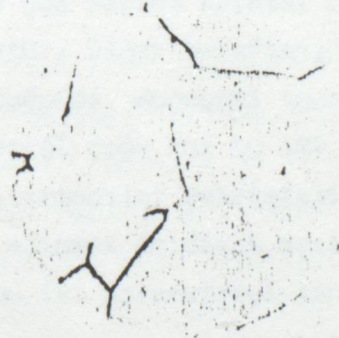
12 I. 570 °C 'de 1 saat
tavlanmış.



12 J. 600 °C 'de 1 saat
tavlanmış.



12 K. 620 °C 'de 1 saat
tavlanmış.



12 L. 650 °C 'de 1 saat
tavlanmış.

Sek.12. Sert çekilmiş bir telin değişik sıcaklıklarda tavlanmasından sonra mikroyapıdaki değişiklikleri gösteren fotomikrograflar. (1000 X)

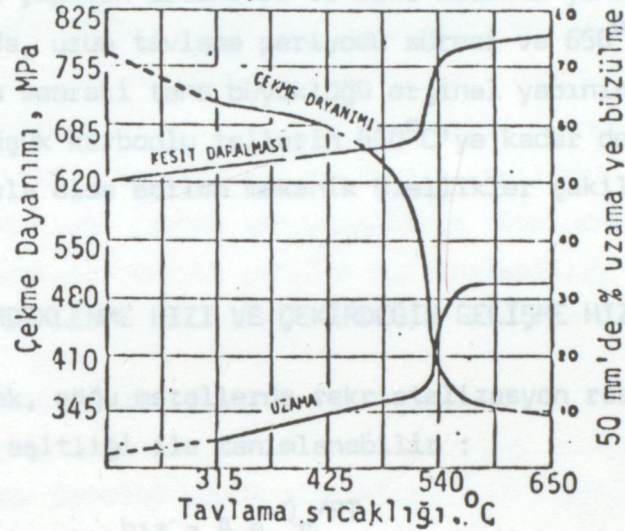
538°C gibi yükseltilmiş bir sıcaklıkta taneler rekristalize olarak yeni taneler oluşur, Plastik deformasyon miktarı büyüdükçe, rekristalizasyon sıcaklığı azalır. Bunun gibi başlangıç rekristalizasyonu ya da yeni tanelerin oluşumu şekil 12'de gösterilmiştir. Tavlama sıcaklığı ve bu sıcaklıkta tutma süresi arttıkça tanelerin büyüklüğünün de arttığı şekil 12'de gösterilmiştir. Her ne kadar teli çekme işlemiyle oluşturulan yapının artıkları ve baki kalıntı dâhil özellikler hala

bulunsa da, çekirdekler rekristalizasyonla yok olur ve yeni taneler oluşur. Bu taneler çekirdeklerinkine benzerdir. Sert çekilmiş düşük karbonlu çelikte, 50 mm'de % uzama ve büzülme

13'de gösterilmiştir. Çekim hızı ve gelişme hızı (2)

Basit olarak, çekim hızı ve gelişme hızı (2)

aktivasyon enerjisi, çekim hızı ve gelişme hızı (2)



Şek.13. Sert çekilmiş düşük karbonlu çelik telde 50 °C'ye kadar değişik sıcaklıklarda tavlama sonras mekanik özelliklerdeki değişiklikleri gösteren eğriler.

teldeki "hız" çekirdek oluşum hızına ve aynı zamanda çekirdeklerin gelişme hızına bağlıdır. Bu iki hız aynı zamanda rekristalize olan

matrisin nihai tane büyüklüğünü de belirler. Eğer çekirdek oluşum hızı ve gelişme hızı yavaş ise, rekristalizasyon sürecini tanımlayan

karşılıklı gerilimlerinden önce çok sayıda kristal oluşur. Bu durumda sınırsız tane boyutu küçüktür. Diğer taraftan, çekirdeklenme hızı gelişme hızına göre küçük olduğunda, sınırsız tane boyutu büyük

olacaktır. Rekristalizasyon kinetiği çoğu kez bu iki hız terimiyle tanımlanabildiği için, bazı araştırmacılar rekristalizasyon meka-

nizması hakkında daha çok bilgi edinmek amacıyla eşitli şartlar altında bu ilişkileri ölçtüler. Bu iki parametreyi tanımlamak gereklidir:

1. Çekirdeklenme hızı (N)

2. Çekirdek gelişme hızı (G)

Çekirdeklenme hızı (N), genellikle rekristalize olmayan matrisin

538°C gibi yükseltilmiş bir sıcaklıkta taneler rekristalize olarak yeni taneler oluşur, Plastik deformasyon miktarı büyüdükçe, rekristalizasyon sıcaklığı azalır. Bunun gibi başlangıç rekristalizasyonu ya da yeni tanelerin oluşumu şekil 12'de gösterilmiştir. Tavlama sıcaklığı ve bu sıcaklıkta tutma süresi arttıkça tanelerin büyüklüğünün de arttığı şekil 12'de gösterilmiştir. Her ne kadar tel çekme işlemiyle oluşturulan yapının artıkları ve bazı kalıntı yönsel özellikler hala bulunsa da, uzun tavlama periyodu süresi ve 650°C'deki bir rekristalizasyondan sonraki tane büyüklüğü orjinal yapınıninkine benzerdir. Sert çekilmiş düşük karbonlu tellerin 650°C'ye kadar değişik sıcaklıklarda tavllanmasıyla elde edilen mekanik özellikler şekil 13'de gösterilmiştir. (5)

2.4. ÇEKİRDEKLENME HIZI VE ÇEKİRDEĞİN GELİŞME HIZI (2)

Basit olarak, çoğu metallerde rekristalizasyon reaksiyonu basit bir aktivasyon eşitliği ile tanımlanabilir :

$$\text{hız} = A e^{-Q_r/RT}$$

Çekirdeklenme ve gelişme reaksiyonunun çift karakterinden dolayı bu empirik eşitlik, rekristalizasyon sırasında oluşan atomik mekanizmalar hakkında çok az açıklama yapmaktadır. Rekristalize olan bir metaldeki "hız" çekirdek oluşum hızına ve aynı zamanda çekirdeklerin gelişme hızına bağlıdır. Bu iki hız aynı zamanda rekristalize olan metalin nihai tane büyüklüğünü de belirler. Eğer çekirdek oluşumu hızlı ve gelişmesi yavaş ise, rekristalizasyon prosesini tamamlayan karşılıklı çarpışmalarından önce çok sayıda kristal oluşur. Bu durumda sonuçsal tane boyutu küçüktür. Diğer taraftan, çekirdekleme hızı gelişme hızına göre küçük olduğunda, sonuçsal tane boyutu büyük olacaktır. Rekristalizasyon kinetiği çoğu kez bu iki hız terimiyle tanımlanabildiği için, bazı araştırmacılar rekristalizasyonun mekanizması hakkında daha çok bilgi edinmek ümidiyle eşışıl şartlar altında bu nicelikleri ölçtüler. Bu iki parametreyi tanımak gereklidir:

N : Çekirdeklenme hızı

G : Çekirdek gelişme hızı

Çekirdeklenme sıklığı, N, genellikle rekristalize olmamış matriksin

bir santimetrekübünde saniye başına oluşan çekirdek sayısı olarak tanımlanır. Bu parametre rekristalize olmamış matrikse dayandırılmıştır, çünkü, rekristalize olmuş kısım (ilave çekirdeklenmeye dikkat edildiğinde) atıldır. Lineer gelişme hızı G , rekristalize olmuş tanenin çapının değişiminin zaman hızı olarak tanımlanmıştır. Pratikte G , seçilen bir eşsıl sıcaklıkta özdeş numunelerin farklı sürelerle tavllanmasıyla ölçülür. Numuneler oda sıcaklığına soğutulduktan ve metalografik olarak hazırlandıktan sonra her numunedeki en büyük tanenin çapı ölçülür. Eşsıl tavlama süresiyle bu çaptaki değişim gelişme hızı G 'yi verir. Çekirdeklenme hızı aynı metalografik numunelerin her birinin yüzeyinde birim alandaki tane sayısının sayılması ile belirlenebilir. Bu yüzey-yoğunluğu ölçümü sonradan birim hacmindeki rekristalize olmuş tane sayısını verecek şekilde kullanılabilir. Doğal olarak, her belirleme, rekristalize olmuş matriksin hacmine uyarlanmak zorundadır.

N ve G ile ilgili olarak,

N/G büyük ise taneler küçük olacaktır

N/G küçük ise taneler büyük olacaktır.

diyebiliriz.

2.5. ÇEKİRDEKLERİN OLUŞUMU (2)

Rekristalizasyonda, tamamen yeni bir taneler grubu oluşturulur. Yeni kristaller kayma hattı kesişmeleri, deformasyon ikizi kesişmeleri, ve tane sınırlarına yakın bölgeler gibi yüksek kafes gerinim enerjili noktalarda çekirdeklenir. Her durumda, çekirdeklenmenin kuvvetli kafes eğriliği noktalarında olduğu görülür.

Çekirdekler şiddetli bölgesel deformasyon alanlarında oluştuğundan dolayı ortaya çıkacakları yerler önceden belirlenebilir. Bu tip çekirdekler "Önşekillenmiş çekirdekler" adını alır. Küçük, gerinimsiz hacimlerin oluşmasının (gelişip çevresindeki deforme olmuş matriksi yok edebilecek) nasıl olacağı hakkında bazı modeller vardır. Bu modeller iki noktadan tartışılmaktadır. Birincisi, bir kristal bölgesi bir çekirdek olabilir ve ancak boyutu belli bir minimum değeri aştığında gelişebilir. Örneğin Detert ve Zieb 10^{-12} cm⁻²'lik bir dislokasyon yoğunluğunda deforme olmuş bir metalde, bir çekirdeğin gelişebilmesi

için 150 Å 'den daha büyük bir çapa sahip olması gerektiğini hesaplamıştır.

Bir çekirdeğin oluşumu için diğer hal, bir yüksek açılı tane sınırının en azından kısmen, muadili tarafından çevrelenmiş olmasıdır. Keyfi bir düşük açılı tane sınırının devingenliği normal olarak çok düşük olduğundan bu hal gereklidir. Bu ikisinin dışında başka modeller de vardır. Rekristalize olan deforme edilmiş numunenin doğasına bağlı olarak bu modellerin biri ortaya çıkar. Yüksek açılı tane sınırlarının mevcut olduğu tane sınırları ve üçlü hatlarda, çekirdek oluşumu kriterlerinin biri etkin olarak sağlanmıştır. Baily ve Hirsch'e göre, soğuk şekillendirilmiş bir metalde, bir tane sınırının iki tarafında diskolasyon yoğunluğu farklılığı varsa, tane sınırındaki gerinim enerjisi farklılığının ortaya çıkardığı itici kuvvet altında, daha mükemmel tanenin bir kısmı daha az mükemmel tanenin içine göç edebilir. Bu olay tane sınırının bir çıkıntı oluşturacak şekilde ileri hareketiyle tamamlanabilir. (Şekil 14)

Bu sınır hareketi etkin bir şekilde yolundaki dislokasyonları temizler, küçük, görece gerinimsiz bir kristal yaratır. Bu çıkıntı kritik çekirdek büyüklüğünü aştığında, çekirdek oluşumu için birincil iki şart sağlanmış olur.

Cahn ve Beck'e göre çekirdeklenme mekanizması : Poliganizasyonun bir sonucu olarak, kendisini çevreleyen poliganize matriksin içine doğru gelişebilecek ikincil bir tanenin üretilmesi olasıdır.

2.6. TANE YÖNLENME DAĞILIMI-ŞEKİLLENEBİLİRLİK İLİŞKİSİ

Tane yapısının şekillenebilir metal levha ile ilgili bir karakteristiği tane yönelme dağılımıdır. Bu, levhanın belirli gerinimlerle uyum göstermesini zorlaştırır. Rastgele olmayan tane yönelme dağılımına veya yapıya sahip metal levhalar genellikle anizotropiktir. Genişlik/kalınlık gerinimlerinin oranına, r - değeri adı verilir. Bir levha malzeme levha düzleminde tüm olası yönlerde çekme numunelerinin çekilmesiyle

elde edilen tüm olası r -değerlerinin ortalamasına $\bar{r}$ değeri denir.

Tek tek r -değerleri arasındaki değişikliğinin fazla kiymasıdır.

denir. (4)

İki boyutlu bir malzeme için r ya da $\bar{r}$ değeri tarafından kontrol edil-

len malzeme için bilgi verdiğinden dolayı.

Yine, r değeri ve bu tip her türlü

bilgi, malzemenin genel olarak bir nedenden dolayı, kristal-

leşme hızı (özellikle anizotropinin başka

malzeme türünde koruyucu yapıyla ilgili

olabilir. (4)

Şek.14. Tane sınırında çekirdek oluşumu için

çıkıntı mekanizması, Bailly ve Hirsch'e göre. (15)

Şekildeki bağlantı tüm kübik malzemelerde uygulanabi-

lir, fakat bu serinin dışında yapılacak olan extrapolasyonlar hatanın

aralığına yol açacaktır. (4)

Çekirdeklerin oluşumu, malzemenin içinde, tane büyümesi sırasında

potansiyel çekirdeklerin oluşumu da etkililer. Veya de bu tür-

ler, daha önceden çekirdeklerin oluşumu (11) ile yavaşlatılabilir.

Çekirdeklerin bir başka türü, malzemenin içindeki engellemenin çok daha güçlü bir

etki, bu türden çekirdeklerin oluşumu hızını kristalleşme hızında (11)

ya da malzemenin içindeki engellemenin çok daha güçlü bir

etki, bu türden çekirdeklerin oluşumu hızını kristalleşme hızında (11)

ya da malzemenin içindeki engellemenin çok daha güçlü bir

etki, bu türden çekirdeklerin oluşumu hızını kristalleşme hızında (11)

ya da malzemenin içindeki engellemenin çok daha güçlü bir

etki, bu türden çekirdeklerin oluşumu hızını kristalleşme hızında (11)

ya da malzemenin içindeki engellemenin çok daha güçlü bir

etki, bu türden çekirdeklerin oluşumu hızını kristalleşme hızında (11)

ya da malzemenin içindeki engellemenin çok daha güçlü bir

etki, bu türden çekirdeklerin oluşumu hızını kristalleşme hızında (11)

ya da malzemenin içindeki engellemenin çok daha güçlü bir

etki, bu türden çekirdeklerin oluşumu hızını kristalleşme hızında (11)

ya da malzemenin içindeki engellemenin çok daha güçlü bir

etki, bu türden çekirdeklerin oluşumu hızını kristalleşme hızında (11)

ya da malzemenin içindeki engellemenin çok daha güçlü bir

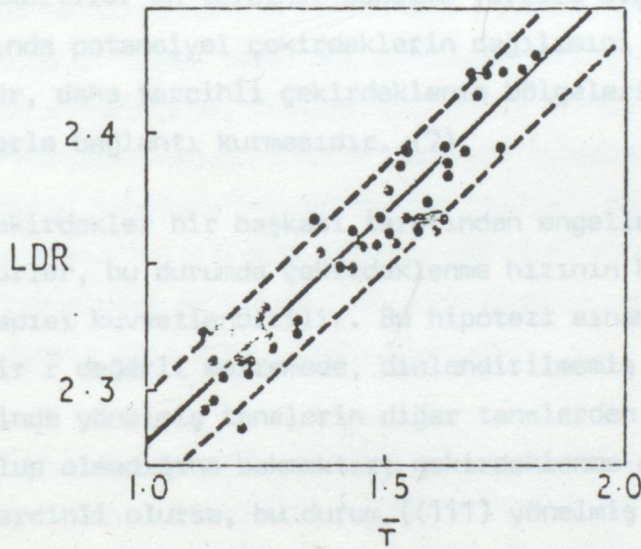
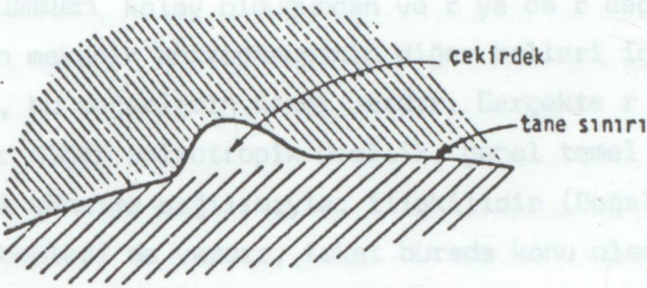
etki, bu türden çekirdeklerin oluşumu hızını kristalleşme hızında (11)

ya da malzemenin içindeki engellemenin çok daha güçlü bir

etki, bu türden çekirdeklerin oluşumu hızını kristalleşme hızında (11)

ya da malzemenin içindeki engellemenin çok daha güçlü bir

etki, bu türden çekirdeklerin oluşumu hızını kristalleşme hızında (11)



Şek.15. Ortalama r - değerinin fonksiyonu olarak limit çekilebilirlik oranı ile gösterilen derin çekilebilirlik ilişkisi.

Rekristalizasyon çalışmalarında diğer bir önemli faktör rekristalizasyon hızıdır. Bu, rekristalizasyonun sonundaki kristal büyüklüğüdür.

elde edilen tüm olası r -değerlerinin ortalamasına $\bar{r}$ değeri denir.

Tek tek r -değerleri arasındaki değişikliğın fazla kısmına Δr denir. (4)

Ölçümleri kolay olduğundan ve r ya da $\bar{r}$ değeri tarafından kontrol edilen mekanik anizotropinin diğer halleri için bilgi verdiğinden dolayı, bu değerlerin önemi vardır. Gerçekte r değeri ve bu tip herhangi bir diğer anizotropik özellik, genel temel oluşturan bir nedenle, kristal yönelme dağılımıyla, ilişkilidir (Doğallıkla anizotropinin başka sebepleri de vardır, fakat burada konu olan yalnızca yapıyla ilgili olanıdır.) (4)

$\bar{r}$ değeri ile ilişkili olarak en iyi bilinen özellik şekil 15'de gösterilen limit çekilebilme oranı ile karakterize edilmiş olan derin çekilebilirliktir. Şekildeki bağıntı tüm kübik malzemelerde uygulanabilir, fakat bu sahanın dışında yapılacak olan extrapolasyonlar hatanın artmasına yol açacaktır. (4)

Çökeltiiler en tercihli çökelme yerleri dışında, tane büyümesi sırasında potansiyel çekirdeklerin dağılımını da etkiler. Yine de ana faktör, daha tercihli çekirdeklenme bölgelerin (111) ile yönelmiş tanelerle bağlantı kurmasıdır. (7)

Çekirdekler bir başkası tarafından engellenmemişse çok daha çabuk büyürler, bu durumda çekirdeklenme hızının kısıtlanması halinde (111) yapısı kuvvetlendirilir. Bu hipotezi sınamak için iyi bir yol, düşük bir $\bar{r}$ değerli malzemede, dinlendirilmemiş çelikler gibi, (111) düzleminde yönelmiş tanelerin diğer tanelerden ortalama olarak daha fazla olup olmadığına bakmaktır; çekirdeklenme aşamasında bu taneler daha tercihli olursa, bu durum ((111) yönelmiş tanelerin daha fazla olması) meydana gelir. (7)

2.7. REKRİSTALİZE TANE BOYUTU (2)

Rekristalizasyon çalışmalarında diğer bir önemli faktör rekristalize olmuş tane büyüklüğüdür. Bu, rekristalizasyonun sonundaki kristal büyüklüğüdür.

Şekil 16'da rekristalizasyon sonucu tane boyutunun numunenin tavlanmadan önceki deformasyon miktarına bağlılığı gösterilmiştir. Deformasyon miktarının azalmasıyla birlikte tane boyutunun hızlı bir büyüme göstermesi önemli bir sonuç olarak ortaya çıkmaktadır. Çok küçük deformasyonlarda ise rekristalizasyon olanaksız olmaktadır. Böylece "kritik soğuk şekillendirme derecesi" kavramı gündeme gelmektedir. Bu kavram numunenin (uygun bir zaman periyodu içerisinde) rekristalize olabileceği en düşük soğuk deformasyon miktarı olarak tanımlanabilir. Kritik deformasyon, rekristalizasyon sıcaklığı gibi, deformasyonun tipi ile değişen bir değer olduğu için, metalin bir özelliği değildir.

Kritik deformasyon kavramı, arzu edilmeyen çok büyük tane boyutlarına neden olabileceği için önemlidir. Bu özellikle, soğuk biçim verilerek karmaşık şekillere sokulacak levha metaller için önemlidir. Bir metalin tane boyutu çok küçükse (0.05 mm'den daha küçük çapta) yüzeyde sezilebilir bir pürüzlenme meydana gelmeksizin plastik deformasyon oluşur. Diğer taraftan, ortalama tane çapı büyükse, soğuk şekillendirme sonucu kaba, pürüzlü bir yüzey üretilir. Bu tür olaylar çoğunlukla "Portakal kabuğu etkisi" teriyle tanımlanır (yüzeyin pürüzlüğü portakal kabuğuna benzediğinden dolayı). Kristaller içindeki plastik gerininin anizotropik doğası, portakal kabuğu etkisinden doğrudan sorumludur ve kristaller daha büyükçe deformasyonun homojen olmayan doğası daha açık, belli olacaktır.

Soğuk haddelenmiş (levhalar) ya da kalıpta soğuk çekilmiş (teller, çubuklar ve borular) metallerde, kritik soğuk şekillendirme derecesinin kötü etkisinden sakınmak daha kolaydır, çünkü bu metaller oldukça üniform bir şekilde deforme olurlar. Diğer taraftan bir metalik

malzemenin yalnızca bir kısmı soğuk şekillendirilmişse ; şekillendirilmiş ve şekillendirilmemiş bölgeler arasında kritik şekil değiştirme derecesindeki bir bölge vardır. Bu durumda tavlama bölgesel olarak çok kaba tane nin gelişmesine kolayca yol açabilir.

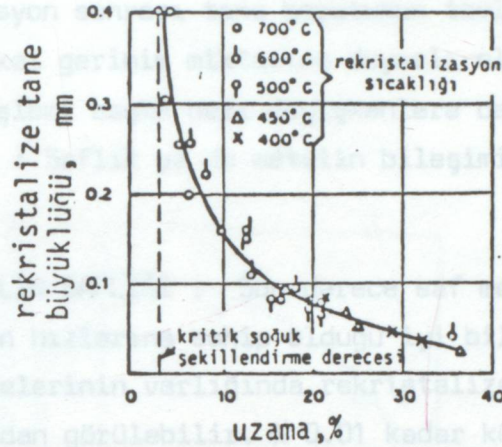
Çekirdeklenme hızının gelişme hızına oranı, N/G rekristalizasyon verilerinin yorumlanmasında sıklıkla kullanılır. Bir eşitsiz rekristalizasyon işlemi için N ve G sabit veya ortalama değerler olduğu kabul edilirse, rekristalize tane boyutu bu orandan bulunabilir. Bu oran yüksekse , rekristalizasyon işlemi tamamlanmadan önce çok sayıda çekirdek oluşacaktır ve ince tane boyutu elde edilecektir. Diğer taraftan, düşük bir oran gelişme hızına göre yavaş bir çekirdeklenme hızın karşılık gelecek, rekristalize edilmiş numunede kaba bir kristal büyüklüğü elde edilecektir. Şekil 17'de görüleceği gibi tavlama öncesi deformasyon oranı azaldıkça çekirdeklenme hızı gelişme hızından çok daha hızlı olarak düşer. Sonuç olarak gerinin azalmasıyla N/G büyüklüğü azalır. % birkaç uzama için bu değer sıfırdır.

Kritik soğuk şekillendirme derecesinin, rekristalizasyon için gerekli olan çekirdek oluşumunu ancak yaratabilecek bir miktar olduğuna karar verilebilir. Bu, çekirdek oluşumunun kafesteki yüksek gerinim enerjili noktalarda olduğu gerekçesiyle de uyusmaktadır. Bu noktaların sayısı doğal olarak , deformasyonun şiddetiyle artacak ve düşük gerinimlerde kaybolacaktır.

Rekristalize tane büyüklüğüyle ilgili bir diğer önemli etken, şekil 16'da görülmektedir. Rekristalize tane boyutu rekristalizasyon sıcaklığından bağımsızdır. Dikkat edilirse 5 farklı sıcaklıkla ilgili veriler vardır ve bunların tümü yalnızca tek bir eğriye düşmektedir. Bu ilişki başka birçok metal için de belirli sınırlarda aynıdır. Buradan rekristalizasyonun sonunda metalin tane büyüklüğü rekristalizasyon sıcaklığından bağımsızdır, diyebiliriz.

2.8. REKRİSTALİZASYONDA DİĞER ETKENLER

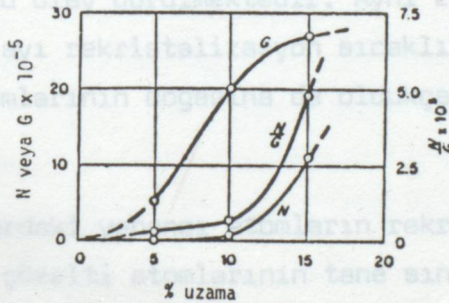
Şimdiye kadar rekristalizasyon oranının iki değişkene bağlı olduğu gösterildi : Tavlama sıcaklığı ve deformasyon miktarı. Aynı şekilde rekristalizasyon hızının da bu iki değişkene bağlı olduğu gösterildi. Rekristalizasyon hızının, tavlama sıcaklığına bağlı olduğu da gösterildi. Bu bağlamda, rekristalizasyon hızının, tavlama sıcaklığına bağlı olduğu da gösterildi. Bu bağlamda, rekristalizasyon hızının, tavlama sıcaklığına bağlı olduğu da gösterildi.



Şek.16. Soğuk şekillendirmenin alfa pirincinin rekristalize tane büyüklüğü üzerindeki etkisi. Sıfır bir metal ticari sıfır bir metalden çok daha düşük sabit bir sıcaklık aralığında rekristalize olur. (2)

Çözelti atomlarının rekristalizasyon oranına etkisi en fazla çok düşük konsantrasyonlarda görülür. Şekil 16'da Al'un değişik saflık dereceleri için bu olay görülmektedir. Aynı zamanda yabancı atomların varlığından dolayı rekristalizasyon hızında meydana gelen artışın çözelti atomlarının varlığına bağlı olduğu gözlemlenmiştir. (2)

Çok düşük miktarlarda yabancı atomların rekristalizasyon hızındaki belirgin etkisi, özellikle düşük sıcaklıklarda daha belirgin olarak gözlemlenmiştir. (2)



Şek.17. Çekirdeklenme hızı (N), çekirdek gelişme hızı (G), ve bunların oranlarının (N/G) tavlama sıcaklığına bağlı olduğu. (Veriler 350 °C 'de tavllanmış Al içindir.)

ve büyürken tane büyüklüğü de artar. Ortada ve bu sınırlarda yabancı atomların varlığı, atomların hareketini oldukça geciktirir ve bundan dolayı rekristalizasyon hızı düşer. (2)

2.8. REKRİSTALİZASYONDA DİĞER ETKENLER

Şimdiye kadar rekristalizasyon oranının iki değişkene bağlı olduğu gösterildi : Tavlama sıcaklığı ve deformasyon miktarı, Aynı şekilde rekristalizasyon sonrası tane boyutunun tavlama sıcaklığına bağlı olmadığı, fakat gerinim miktarına duyarlı olduğu gösterildi. Rekriztalizasyon işlemi başka bazı değişkenlere de bağlıdır. Bunlardan en önemli ikisi : Saflık ya da metalin bileşimi ile deformasyon öncesi tane boyutu.

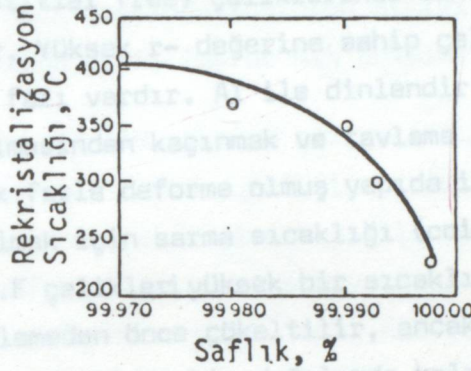
2.8.1. METALİN SAFLIĞI : Son derece saf metallerin çok yüksek rekristalizasyon hızlarına sahip olduğu iyi bilinen bir gerçektir. Bu çözelti maddelerinin varlığında rekristalizasyon sıcaklığının keskin bağımlılığından görülebilir. % 0.01 kadar küçük bir yabancı atomun katı çözelti içinde bulunması rekristalizasyon sıcaklığını birkaç yüz derece kadar yükseltebilir. Tam aksine , spektroskopik saf bir metal ticari saf bir metalden çok daha düşük sabit bir sıcaklık aralığında rekristalize olur. (2)

Çözelti atomlarının rekristalizasyon oranına etkisi en fazla çok düşük konsantrasyonlarda görülür. Şekil 18'de Al'un değişik saflık dereceleri için bu olay görülmektedir. Aynı zamanda yabancı atomların varlığından dolayı rekristalizasyon sıcaklığında meydana gelen artışın çözelti atomlarının doğasına da oldukça bağlı olduğu gözlenmiştir. (2)

Çok düşük miktardaki yabancı atomların rekristalizasyon hızındaki belirgin etkisi, çözelti atomlarının tane sınırları ile birbirlerini etkilemesinden dolayıdır. Bu karşılıklı etki dislokasyonlar ve çözelti atomlarının arasındaki ilişkiye benzerdir. Bir yabancı atom bir tane sınırına göç ettiği zaman, sınırının olduğu gibi her ikisinde elastik alanı, azaltılır. Rekristalizasyonda çekirdek oluşur. ve büyürken tane sınırı hareketi meydana gelir. Ortamda ve bu sınırlarda yabancı atomların varlığı sınırların hareketini oldukça geciktirir ve bundan dolayı rekristalizasyon hızı düşer. (2)

Bezi oksit ve sülfür kalıntıları çözürmemiş karbürlerle birlikte tane büyümesini engelleme rolü oynarlar. Karbürler esas olarak sıcak haddelenmeden sonra tane sınırı lamelleri olarak bulururlar ve daha büyük oksitler rekristalizasyon geciktirmesini teşvik ederler bu iki etki kaba bir tane büyüme hızına gelişmesine karşı etki yaparlar. (4)

Al ile dinlendirilmiş çeliklerin geleneksel işleminde, dinlendirilmemiş çeliklerden daha yüksek r - değeri elde edilir. Buna karşın, I.F. (Intermetallic free) çeliklerinde daha yüksek r - değerleri elde edilebilir. Bu r - değere sahip çeliklerde çoğunlukla çok ince bir çökelti vardır. Al ile dinlendirilmiş çeliklerde erken Al-nitrür çökeltisi kaçınmak ve yavaşlama işlemiyle çelik yavaşça rekristalizasyon geçirme olmuş ya da ince bir formda çökeltmesini garantiye almak için sarmal sıcaklığı (rolling temp) düşürülür. Bununla birlikte, I.F. çelikler bu sıcaklıkta sarılır ve NbC ve de TiC sıcak haddelenme öncesi daha kararlı olan parçacıklar işleme boyunca ince bir dağılımda kalırlar. Böylece önemli özellik,



Şek.18. Safsızlıkların % 80 soğuk haddelenmiş Al'un rekristalizasyon sıcaklığı üzerindeki etkisi. (Tavlama süresi 30 dak.)

Al ile dinlendirilmiş çelikler, dinlendirilmemiş çeliklerden daha sağlam bir yapı geliştirmelerine ek olarak, farklı bir özellikte sahiptir : Tavlama koşulları taneler haddede yönünde uzamıştır. Bunun nedeni, soğuk şekillendirme yapısındaki çökeltide bulunan alüminyumitlerin tane sınırlarına dağılmasıdır. Bu dağılım tane sınırı hareketini etkileyerek rekristalize olmuş yapıdaki tane sınırlarının son durumlarını açıkça etkiler (5)

Rekristalize edilmiş Alüminyumla dinlendirilmiş bir çelik geleneksel Alüminyum ile dinlendirilmiş bir çelik ile karşılaştırıldığında Fosfor ilavesiyle aşağıdaki özellikler görülmektedir :

1. Pik ısıtma sırasında, her iki tane sınırı da kimyasal bileşim ve aynı

Bazı oksit ve sülfür kalıntıları çözünmemiş karbürlerle birlikte tane büyümesini engelleme rolü oynarlar. Karbürler esas olarak sıcak haddelemeden sonra tane sınırı lamelleri olarak bulunurlar ve daha büyük oksitler rekristalizasyon çekirdeklenmesini teşvik ederler bu iki etki kaba bir tane büyüklüğünün gelişmesine karşı etki yaparlar. (4)

Al ile dinlendirilmiş çeliklerin geleneksel işleminde, dinlendirilmemiş çeliklerden daha yüksek r- değeri elde edilir. Buna karşın, I.F. (İnterstitial free) çeliklerinde daha yüksek r- değerleri elde edilebilir. Yüksek r- değerine sahip çeliklerde çoğunlukla çok ince bir çökelti fazı vardır. Al ile dinlendirilmiş çeliklerde erken Al-nitrür çökmesinden kaçınmak ve tavlama işleminde çelik yavaşça ısıtılırken çok fazla deforme olmuş yapıda ince bir formda çökmesini garantiye almak için sarma sıcaklığı (coiling temp) düşürülür. Bununla birlikte, I.F çelikleri yüksek bir sıcaklıkta sarılır ve NbC ya da Tic sıcak haddelemeden önce çökeltir, ancak daha kararlı olan parçacıklar işlem boyunca ince bir dağılımda kalırlar. Böylece önemli özellik, rekristalizasyonun çekirdeklenme aşamasında ince bir çökelti dağılmasının varlığı olarak görülür. (4)

Al ile dinlendirilmiş çelikler, dinlendirilmemiş çeliklerden daha sağlam bir yapı geliştirmelerine ek olarak, farklı bir özelliğe sahiptir : Tavlama koşullarında taneler hadde yönünde uzamıştır. Bunun nedeni, soğuk şekillendirme yapısındaki çökeltide bulunan alüminyumnitrürün tane sınırlarına dağılmasıdır. Bu dağılma tane sınırı hareketini etkileyerek rekristalize olmuş yapıdaki tane sınırlarının son durumlarını açıkça etkiler (4)

Refosforize edilmiş Alüminyumla dinlendirilmiş bir çelik geleneksel Alüminyum ile dinlendirilmiş bir çelik ile karşılaştırıldığında fosfor ilavesiyle aşağıdaki özellikler gözlenmektedir :

1. Pik ısıtma hızında, hemen hemen aynı kimyasal bileşim ve aynı

ısıtma hızındaki geleneksel alüminyumla dinlendirilmiş çelik ile karşılaştırıldığında tercihli yönelme $\{111\} \langle 110 \rangle$ dan $\{111\} \langle 112 \rangle$ ye değişir.

2. Daha düşük $\bar{r}$ değeri, daha küçük tane büyüklüğü ve daha az tane uzama oranı elde edilir.
3. Rekristalizasyon hızı az bir miktarda yükseltilir.
4. Düşük $\{111\}$ ve yüksek $\{100\}$ yoğunlukları elde edilir.

AlN çökelme hızı üzerinde fosforun etkisi dikkate alınmalıdır. Şekil 19'dan görüldüğü gibi, fosfor AlN çökelme hızını arttırır.

Fosforun yalnızca AlN çökelme hızını arttırmadığı fakat aynı zamanda rekristalizasyonda AlN'ün geciktirme etkisini zayıflattığı da görülmektedir. Gözlenen pik ısıtma hızı ile hesaplanan arasındaki güzel uyuşmanın fosforun AlN çökelme davranışı üzerindeki bu etkilerinden dolayı olduğu düşünülmüştür. Yani, AlN çökelme hızının yükselmesi pik ısıtma hızını hızlandırır, ve AlN'ün rekristalizasyonda geciktirme etkisinin zayıflaması pik ısıtma hızını yavaşlatır. Sonraki etkinin, AlN'ün çökelme bölgelerinde fosforun etkisi üzerinde temellenmesi gerekir. Reforsforize edilmiş alüminyumla dinlendirilmiş çelikte gözlenen daha düşük $\bar{r}$ - değeri, daha küçük tane büyüklüğü, daha az tane uzama oranı ve daha hızlı rekristalizasyon hızının fosforun AlN'ün çökelme bölgelerindeki bu etkisine dayandırılması gerektiği düşünülür. Ve eğer fosfor rekristalizasyonda AlN'ün geciktirme etkisini zayıflatırsa, AlN'den dolayı olan $\{111\}$ çekirdeğinin dışında çekirdeklenmenin aşırı sınırlanması, alüminyum ile dinlendirilmiş çeliklerde çoğunlukla gözlemlendiği gibi, hafifleyecektir; bunun sonucu da $\{111\}$ yoğunluğunda bir azalma ve $\{100\}$ yoğunluğunda bir artmadır. (7)

Bu çalışmadaki soğuk haddelenmeden önce AlN çökelmeli numunelerde de fosfor, tercihli yönelmede $\{111\} \langle 110 \rangle$ dan $\{111\} \langle 112 \rangle$ ye doğru bir değişikliğe neden olur. Bu, AlN ile karşılıklı etkisinden bağımsız olarak fosforun $\{111\}$ çekirdeklenmesi üzerinde bazı özel etkilere sahip olabileceğini ileri sürer. Bu, $\{111\} \langle 112 \rangle$ tercihli yönelmesinin oluşum mekanizmasını rekristalizasyon sırasında fosfor ve alt-tane sınırları ya da tane sınırları arasındaki karşılıklı etkiye dayandırır.

Eğer fosfor alt-tane sınırları ya da tane sınırları ile karşılıklı etki yapıyorsa rekristalizasyon geciktirilmiş olmalıdır.

AlN, rekristalizasyonda fosfor ile karşılıklı etkisinden dolayı $\{111\}$, $\{100\}$ ve $\{110\}$ yoğunlukları arasındaki dengeyi sağlar ve fosfor AlN ile karşılıklı etkisinden bağımsız olarak $\{111\}$ çekirdeklenmesini, özellikle de yönünü etkiler.

Rekristalizasyon sırasında farklı roller oynayan iki tür AlN vardır; bunlardan biri refosforize edilmiş çeliğin bir karakteristiği olan $\{111\}$ $\langle 112 \rangle$ yönlenmesini geliştirir ve fosforla karşılıklı etki yapar, diğeri ise geleneksel alüminyumla dinlendirilmiş çeliğin bir özelliği olan $\{111\}$ $\langle 110 \rangle$ 'ı geliştirir. İlkinin rekristalizasyonda geciktirme etkisi ikincisinden daha azdır ve bundan dolayı çekirdeklenmede şiddetli yönlenme seçiciliğini hafifletir. (7)

2.8.2. BAŞLANGIÇ TANE BÜYÜKLÜĞÜ VE ISITMA HIZI : Polikristalin bir malzeme soğuk şekillendirildiği zaman, tane sınırları kristal içinde meydana gelen kayma işlemlerini kesici rol oynar. Sonuç olarak tane sınırına komşu olan kafes, tanenin merkezindekinden daha fazla bozunuma uğrar. Tane büyüklüğü azalırken tane sınırları artar ve sonuç olarak deformasyona uğrayan metalin (sınırlara komşu olan) hacmi ve üniformluğu da artar. Bu etki olası çekirdeklenme yerlerinin sayısını da arttırır ve bundan dolayı, metalin başlangıçtaki tane büyüklüğünün küçülmesi, çekirdeklenme hızını büyütecek ve verilen deformasyon derecesi için sonuçsal tane büyüklüğünü küçültecektir. (2)

Yüzey kalitesi bakımından, çok büyük bir tane büyüklüğüne sahip bir çelik gerinime uğradığı zaman taneli mat bir görünüş olacağı açıktır. Bunun nedeni, komşularından farklı bir yönlenmeye sahip her yüzey tanelinin, serbest yüzeyinde az farklı bir yol içerisinde deforme olmasıdır. Tane büyüklüğü 40 μm 'den daha büyükse birbirlerine göre eğimleri çıplak gözle açık olarak görülebilir; bu tür yüzeylere "portakal kabuğu görünümlü yüzey" denir. Bu durum, şekillendirme amaçlı levha metallerde tane büyüklüğü için bir üst sınırı belirler çeliğe özgül değildir.

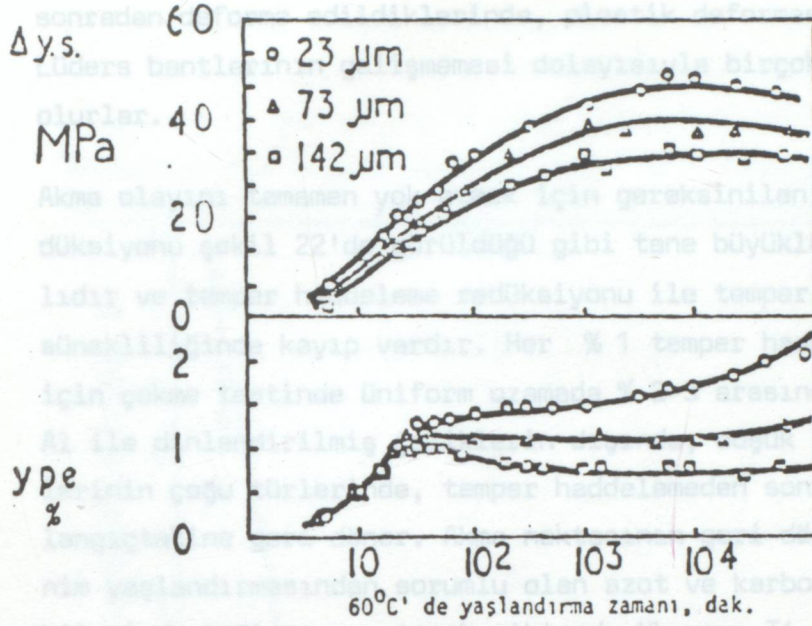
Yalnızca çelik için değil, keskin bir akma sınırı gösteren metaller için tane büyüklüğü alt limitini, ortam civarında sınırlandıran bir olay vardır. Bu olay, düşük karbonlu çeliklerin büyük çoğunluğunda tavlanmış ve gerinim yaşlandırmasına uğratılmış durumda Lüders bantlarının oluşumudur. (4)

Lüders bantları, farklı çekirdeklerden plastisitenin yayılmasının kanıtıdır. Lüders bandının kenarı, akmış olan malzeme ile elastik bölge arasında sınırdır. Malzeme boyunca alt akma geriliminde hareket eder. Plastik bölgelerin çekirdeklenmesi için gerekli gerilme, üst akma gerilmesi, gerilme konsantrasyonlarının varlığına karşı çok duyarlıdır.

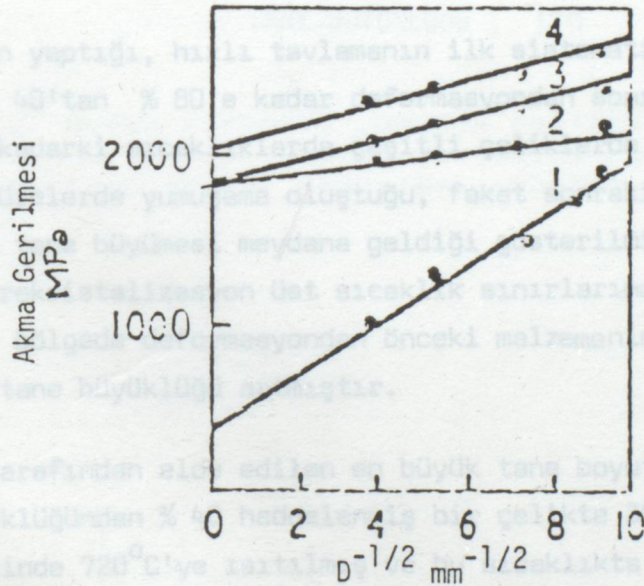
Tamamen üniform olandan daha çok, bu farklı anlamdaki akma, iki yönden zayıf bir yüzey görüntüsü verir. Eğer akma malzemeye tamamen yayılmıyorsa, Lüders kenarında kalınlıkta kademeli değişiklikler vardır. Bunlar akma noktası uzamasına doğrudan orantılıdır : akmış malzemedeki şekillendirme sertleştirmesi için önceden akmış bir bölgede olması gereken gerinimin alt akma gerilmesine oranıdır; bu, Lüders bandına yayılma için gereksinilen gerilme olmaktadır. Şekil 20'den görüldüğü gibi akma noktası uzaması tane büyüklüğünün duyarlı bir fonksiyonudur, tane büyüklüğü küçüldükçe artar.

Eğer akma malzemeye tamamen yayılmışsa, buna rağmen yüzey kusurları, birleşmiş farklı plastik kenarlarda ve Lüders kenarının sarsıntılı hareketinin bir sonucu olarak gözlemlenebilir. Böyle sarsıntılı hareketleri lokal gerinimde değişimler olduğunu gösterir ve alt akma gerilmesi gerinim hızına duyarlı olduğundan dolayı kalınlıkta lokal değişikliklere neden olur.

En belirgin akma etkisi tavlanmış malzemedeki bulunur, bu durum Hallpetch eşitliğindeki k_y parametresinin, gerinime uğratılmış ve sonra yaşlandırılmış malzemedeki çok daha büyük değerleri tarafından Şekil 21'de gösterilmiştir. Bundan doğacak ciddi yüzey kusurlarından kaçınmak için, parçayı oluşturmak için herhangi bir işlem yapmadan önce malzemenin temper haddelenmiş olması zorunludur. Temper haddelenme, soğuk haddelenmiş ve tavlanmış levhaların bir hadde merdanesi ile genişliği ve uzunluğu boyunca devamlı olarak her noktada akmaya neden



Şek.20. Düşük karbonlu yumuşak çelikte üç farklı tane büyüklüğü için 60 °C 'de yaşlandırma süresinin fonksiyonu olarak akma gerilmesi artımı ($\Delta y.s.$) ve akma noktası uzaması ($y.p.e.$).



Şek.21. Düşük karbonlu yumuşak çelikte alt akma gerilmesinin tane büyüklüğüne bağımlılığı. 1- tavllanmış numuneler ; 2- tavllanmış ve % 5 gerinim uygulanmış ; 3- 2 gibi ve 60 °C 'de 20 dak. yaşlandırılmış ; 4- 2 gibi ve 60 °C 'de 10000 dak.yaşlandırılmış.

olacak bir haddelemeyi içerir. Bu gibi temper haddelenmiş levhalar sonradan deforme edildiklerinde, plastik deformasyonun yayılması ve Lüders bantlarının gelişmemesi dolayısıyla birçok çekirdeğe sahip olurlar.

Akma olayını tamamen yok etmek için gereksinilen temper haddelenme redüksiyonu şekil 22'de görüldüğü gibi tane büyüklüğüne karşı çok duyarlıdır ve temper haddelenme redüksiyonu ile temper haddelenmiş levhanın sünekliliğinde kayıp vardır. Her % 1 temper haddelenme reaksiyonu için çekme testinde üniform uzamada % 2-3 arasında düşme vardır.

Al ile dinlendirilmiş çeliklerin dışında, düşük karbonlu levha çeliklerinin çoğu türlerinde, temper haddelenmeden sonra akma noktası başlangıçtakine geri döner. Akma noktasının geri dönmesi, normalde gerinim yaşlandırmasından sorumlu olan azot ve karbonun tümünü kimyasal bileşimde bağlamaya yetecek miktarda Nb veya Ti içeren I.F. (interstitial free) çelikler adı verilen düşük karbonlu çeliklerde bulunmaz.

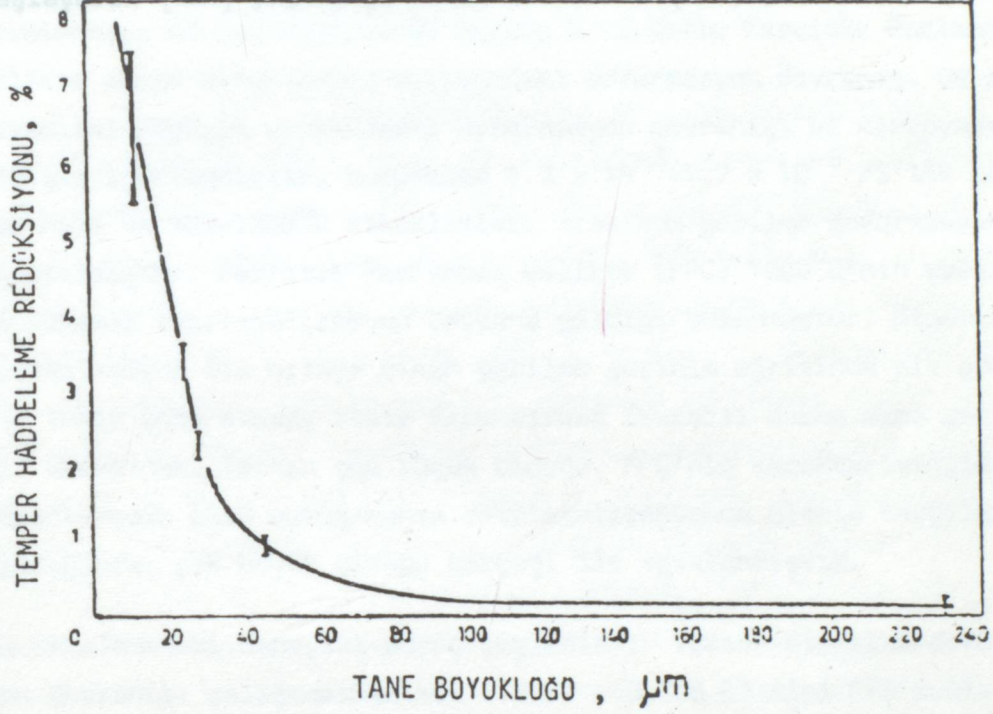
Yavaş ısıtma aktif rekristalizasyon çekirdeklerinin sayısı azaltma rolü oynayabilir ve uzun bekleme süreleri tane büyümesi için fırsatları maksimize eder.

Dewsnap'ın yaptığı, hızlı tavlamanın ilk sistematik çalışmalarından birinde % 40'tan % 80'e kadar deformasyondan sonra ve 680°C'den 720°C'ye kadarki sıcaklıklarda çeşitli çeliklerde 7-100 saniye arasındaki sürelerde yumuşama olduğu, fakat sonraki bekletme sırasında çok küçük tane büyümesi meydana geldiği gösterilmiştir. Doğal olarak, en hızlı rekristalizasyon üst sıcaklık sınırlarında ortaya çıkmıştır. incelenen bölgede deformasyondan önceki malzemenin tane büyüklüğü büyüdükçe, tane büyüklüğü artmıştır.

Dewsnap tarafından elde edilen en büyük tane boyutu, 64 μm başlangıç tane büyüklüğünden % 40 haddelenmiş bir çelikte 36 μm 'dir. Stripler 3 saniye içinde 720°C'ye ısıtılmış ve bu sıcaklıkta 12 saniye tutulmuşlardır. % 60'tan daha büyük olan tüm soğuk haddelenme redüksiyonları için tane büyüklükleri 20 μm veya daha küçüktür. (4)

Refosforize edilmiş alüminyumla dinlendirilmiş çeliklerde, geleneksel

alüminyumla dârlendirilmiş çeliklerde olduğu gibi, ısıtma hızı tipik bir rol oynamaktadır. Bu çeliklerde belirli bir ısıtma hızında r - değeri maksimuma ulaşmaktadır. Buna pik ısıtma hızı adı verilmektedir. Aynı zamanda pik ısıtma hızında rekristalizasyon oldukça geciktirilmektedir. Pik ısıtma hızında, rekristalizasyonun ilk aşamasından başlayarak [10] r değeri r_{max} değeriyle [11] r_{max} değeriyle artar. (7)



Sek.22. Düşük karbonlu yumuşak çelikte ,tane büyüklüğünün fonksiyonu olarak akma noktasını elimine etmek için gereksinilen temper haddelme reduksiyonu.

aluminyumla dinlendirilmiş çeliklerde olduğu gibi, ısıtma hızı tipik bir rol oynamaktadır. Bu çeliklerde belirli bir ısıtma hızında r - değeri maximuma ulaşmaktadır. Buna pik ısıtma hızı adı verilmektedir. Aynı zamanda pik ısıtma hızında rekristalizasyon oldukça geciktirilmektedir. Pik ısıtma hızında, rekristalizasyonun ilk aşamasından başlayarak $\{100\}$ yoğunluğu hızla azalır ve $\{111\}$ yoğunluğu artar. (7)

3. PASLANMAZ ÇELİKLERDE DİNAMİK REKRİSTALİZASYON

3.1. FERRİTİK PASLANMAZ ÇELİKTE DİNAMİK REKRİSTALİZASYON (6)

Ferritik paslanmaz çeliklerdeki dinamik rekristalizasyon olayı, T. Ma-ki S. Okaguchi ve I. Tamura tarafından yapılan aşağıdaki çalışma ile açıklanmaya çalışılmıştır. Bu yazıda % 16 Cr'lu Ferritik Paslanmaz Çelikte sıcak deformasyon sırasındaki deformasyon davranışı ve mikroyapısal değişim sırasındaki deformasyon davranışı ve mikroyapısal değişim incelenmiştir. Numuneler 1.7×10^{-3} - 1.7×10^{-1} /s'lik gerinim hızı ve 800-1200°C sıcaklıkları arasında gerilme deformasyonuna uğratılmıştır. Ferritik Paslanmaz Çelikte (FPC) 1000°C'nin yukarısında dinamik rekristalizasyon meydana geldiği bulunmuştur. Dinamik rekristalizasyon ile ortaya çıkan gerilme gerinim eğrisinde pik gerilme ile takip eden steady state flow stress (kararlı durum akma gerilmesi) arasındaki farkın çok küçük olduğu, FPÇ'nin karakteristiğidir. Bu, toparlanmada olan yumuşamanın rekristalizasyonda olanla karşılaştırıldığında, çok büyük olduğu gerçeği ile açıklanmıştır.

Bu incelemedeki deneysel süreç şöyledir : Yüksek sıcaklık deformasyon davranışı çalışmasında 430 (16 Cr - 0.028 C) tipi FPÇ kullanılmıştır. Çekmenumuneleri merkezi ölçme kesiti 10 mm uzunluk ve 3.5 mm çapta işlenmiş, bir vakum fırınında 800 °C'de 900s. çözme tavlama uygulanmış ve su ile ani soğutulmuştur. Bu çözme işlemi ile ortalama 260 µm ferrit tane büyüklüğü elde edilmiştir. Numuneler Instron tipi çekme makinesi ile 800 - 1200 °C arasındaki değişik sıcaklıklarda ve 1.7×10^{-3} - 1.7×10^{-1} / s gerinim oranlarında çekme deformasyonlarına tabi tutulmuşlardır. Sıcak deformasyon sırasında mikroyapısal değişimin incelenmesi için, numuneler değişik ezme gerinimlerinde deforme edildikten sonra 0.2 s. içinde su ile ani soğutulmuşlardır. Mikroyapı boyuna kesitte optik mikroskop ile incelenmiştir.

FPÇ'nin rekristalizasyon davranışının daha iyi anlaşılması için bir FeCr ferritik alaşımı (18.6 Cr - 0.002 C) kullanılarak soğuk haddelenmiş numunelerin statik rekristalizasyon davranışı da incelenmiştir. Numuneler, çözme tavlamasından sonra oda sıcaklığında % 20-50-80 oranında soğuk haddelenmiş ve 400-1000°C arasında değişik sıcaklıklarda

1.8 ks tavlanmışlardır.

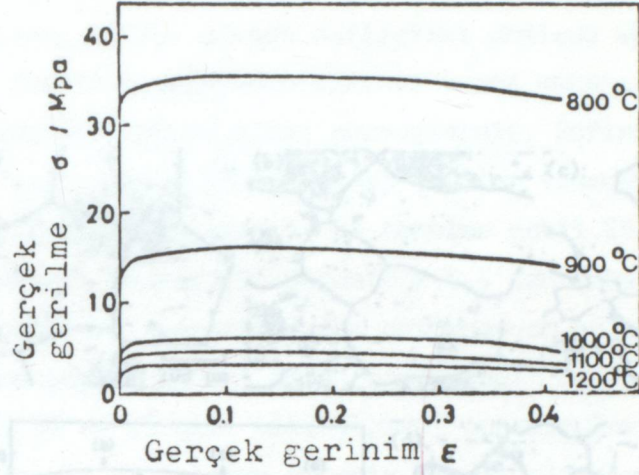
Şekil 23, 800 -1200°C arasında değişik sıcaklıklarda 1.7×10^{-2} / s gerinim hızı değerinde gerinim-gerilme eğrilerini göstermektedir. Eğriler her durumda max gerilmeden itibaren hemen hemen düz görülmektedir. Bununla birlikte, akma eğrisi, gerilmede hafif bir düşme tarafından takip edilen pik gerilmeyi sergilemektedir.

Şekil 24, 1.7×10^{-2} / s gerinim hızında değişik sıcaklıklarda $\epsilon \div 0.4$ -lük deformasyondan sonra hemen ani soğutulmuş numunelerin mikroyapısını göstermektedir. Numune 800 °C'de deforme edildiğinde orijinal ferrit taneleri gerilme doğrultusu boyunca uzamışlardır (24 b.) Dinamik rekristalizasyonun bu şartlar altında oluşmadığı açıkça görülmektedir. Diğer taraftan 1100 °C (24 c.) ve 1200 °C'de (24 d.) deforme edilen numunelerde eşeksenli ferrit taneleri görülmüş ve uzamış ferrit taneleri görülmemiştir. İkincil tanelerin eşeksenli tanelerin içinde hafiften gözlendiği de belirtilmelidir. Eşeksenli tanelerin sınırları, ikincil tanelerin sınırlarıyla karşılaştırıldığında kolayca dağlanmış ve nisbeten yüksek açılı görülmektedir. Eşeksenli ferritlerin tane sınırları oldukça düzensizdir. ve tane boyutu üniform değildir. Bu mikroyapısal özellikler birçok araştırmacı tarafından iyi bir şekilde belirlenmiş olan dinamik rekristalizasyona uğramış östenit tanelerine benzerdir. Bundan dolayı, Şekil 24 c ve 24 d'deki eşeksenli tanelerin dinamik rekristalizasyona uğramış taneler olduğuna karar verilebilir.

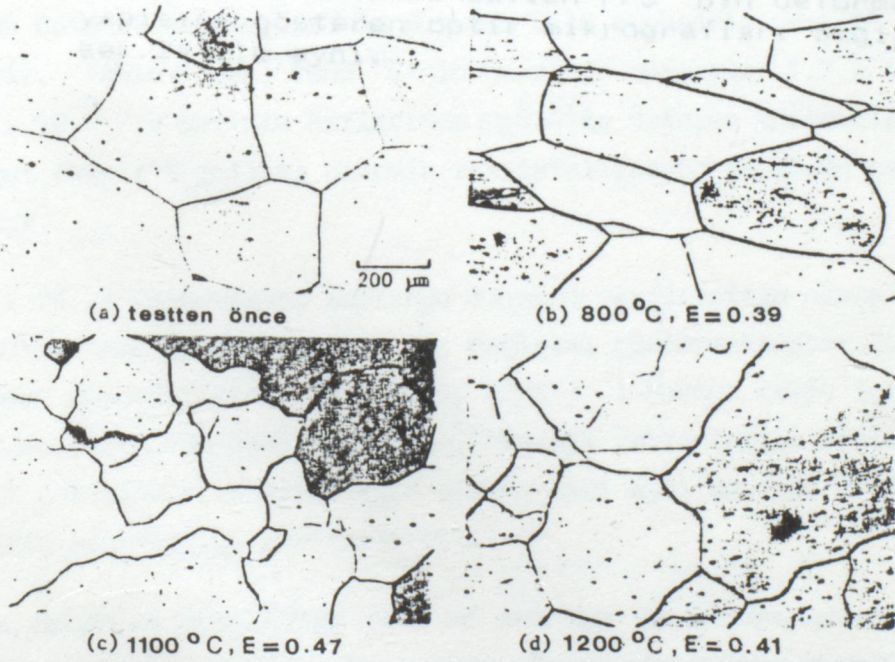
Şekil 25, 1100 °C'de 5×10^{-2} / s gerinim hızında mikroyapısal değişimi göstermektedir. Şekil 25'deki numunelerin gerinimi gerilme - gerinim eğrisinde işaretlenmiş değerlere tekabül eder. Buradaki akma eğrisi ~ 0.4 'ten daha az gerinimdeki (σ_s) tarafından izlenen ~ 0.18 gerinimdeki pik gerilmeyi sergiler, yine de σ_p ve σ_s arasındaki fark çok küçüktür. Başlangıçtaki ferrit yapısı eşeksenli tanelerdir. (25 a.)

Deformasyonun ilk kademelerinde, orijinal taneler az uzamıştır ve tane sınırları az düzensizdir. (25 b; Numune ϵ_p ile ϵ_s 'nin arasında olan

$\epsilon = 0.3$ değerinde deforme edildiğinde, orijinal tane sınırlarının çökinti yapması (↑ ok başıyla gösterilmiş) ve orijinal tane sınırları boyunca yeni ince taneler (↑ ok başlarıyla gösterilmiş) Şekil 25c'den



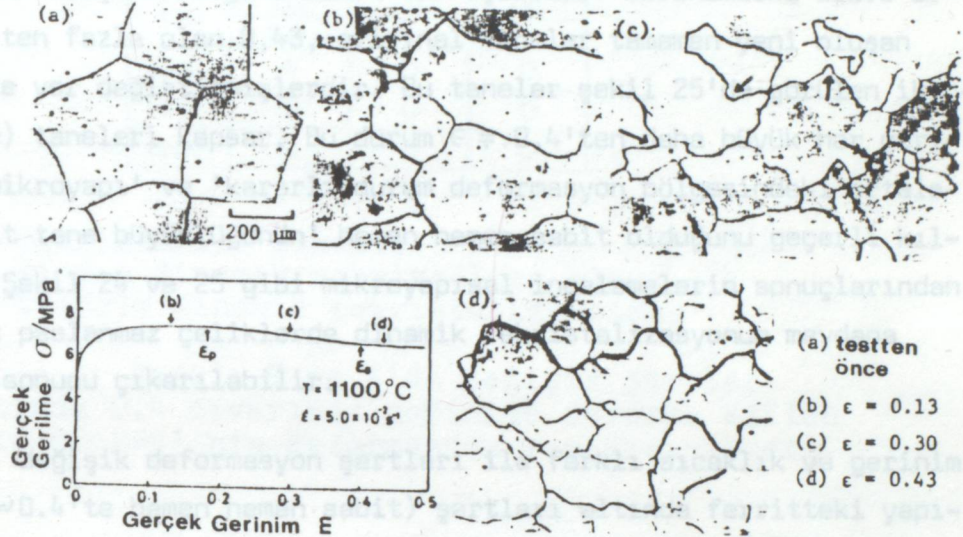
Şek.23. 1.7×10^{-2} /s gerinim hızı ve değişik sıcaklıklarda deforme edilmiş % 16 Cr 'lu ferritik paslanmaz çelikte gerçek gerilme - gerçek gerinim eğrileri.



Şek.24. Değişik sıcaklıklarda deforme edilmiş ve hemen anı soğutulmuş % 16 Cr 'lu FPC 'nin optik mikrografları. ($\epsilon=0.4$ $\dot{\epsilon}=1.7 \times 10^{-2}$ /s). Dağlama ;HF 1 :HNO₃ 1 : gliserin 3 .

görülebileceği gibi sık sık gözlenmiştir. Bu yapı dinamik rekristalizasyonun ilk kademelerine karşılık gelmektedir.

Glover ve Sellars (1973) yüksek saflıktaki demirde dinamik rekristalize edilmiş ferrit tanelerinin çıkıntı yapma mekanizması (bulging) tarafından oluşturulduğunu ileri sürmüştür. Gerinimdeki ilave artım, ϵ_p 'ten itibaren bu mekanizma devreye girer.



Şek.25. 1100 °C ve $\dot{\epsilon} = 5 \times 10^{-2}$ /s ile değişik gerinimlere deforme edilen FCC 'nin deformasyon yapısını gösteren optik mikrograflar. Diyagrama ;

Şekil 26, 2 deformasyon şartında dinamik rekristalize olmuş ferritin ortalama tane büyüklüğündeki ($\bar{D}$) değişimi göstermektedir; 2, Zener-Hollomon parametresidir ($Z = \dot{\epsilon} \exp (Q/RT)$) mevcut çelik için $Q=225$ kcal/mol alınarak belirlenmiştir. Dinamik rekristalize edilmiş östenitik çeliklerin taneleri için olduğu gibi aynı şekilde $\bar{D} = AZ^{-n}$ eşitliğinin geçerliliği görülmektedir.

Keene, Sellars ve Taylor (1969) ticari saf demir için tek birleşim elemanı dinamik rekristalizasyonun hızı ve "zinc refined iron"da dinamik rekristalizasyonun meydana geldiği- ni göstermişlerdir. Glover ve Sellars (1973) yüksek saflıktaki demir ve zinc refined iron'da demir gerilmesinin kritik değeri büyük olduğu belirlenmiş şartlarda ferrit- te dinamik rekristalizasyonun olduğu ve mekanizmaları; ayrıca yapıdaki demir ile karşılaştırılarak zinc refined iron'da dinamik rekristalizasyonun daha yüksek

görülebileceği gibi sık sık gözlenmiştir. Bu yapı dinamik rekristalizasyonun ilk kademelerine karşılık gelmektedir.

Glover ve Sellars (1973) yüksek saflıktaki demirde dinamik rekristalize edilmiş ferrit tanelerinin çıkıntı yapma mekanizması (bulging) tarafından oluşturulduğunu ileri sürmüşlerdir. Gerinimdeki ilave artım, ϵ_s 'ten fazla olan 0,43, orijinal taneler tamamen yeni oluşan tanelerle yer değiştirmişlerdir. Bu taneler şekil 25'de görülen ikincil (sub) taneleri kapsar. Bu durum $\epsilon \neq 0.4$ 'ten daha büyük her gerinimde 'mikroyapı' ve 'kararlı durum deformasyon bölgesindeki ortalama ferrit tane büyüklüğünün' hemen hemen sabit olduğunu geçerli kılmıştır. Şekil 24 ve 25 gibi mikroyapısal incelemelerin sonuçlarından, ferritik paslanmaz çeliklerde dinamik rekristalizasyonun meydana geldiği sonucu çıkarılabilir.

Tablo 1, değişik deformasyon şartları ile farklı sıcaklık ve gerinim hızı ($\epsilon \sim 0.4$ 'te hemen hemen sabit) şartları altında ferritteki yapısal değişimin özetini göstermektedir. Bu çelikte 900 °C'de sıcak deformasyon sırasında orijinal ferrit tane sınırları boyunca küçük miktarda östenit oluşmuştur. Bu durumda bile eşeksenli taneler gözlenmiştir. Tablo 1'den, 1000 °C'nin üzerinde numuneler $1.7 \times 10^{-1} - 1.7 \times 10^{-3}$ / s gerinim hızlarında $\epsilon \neq 0.4$ 'te deforme edildikleri zaman mevcut ferritik çelikte dinamik rekristalizasyon olduğu belli olacaktır.

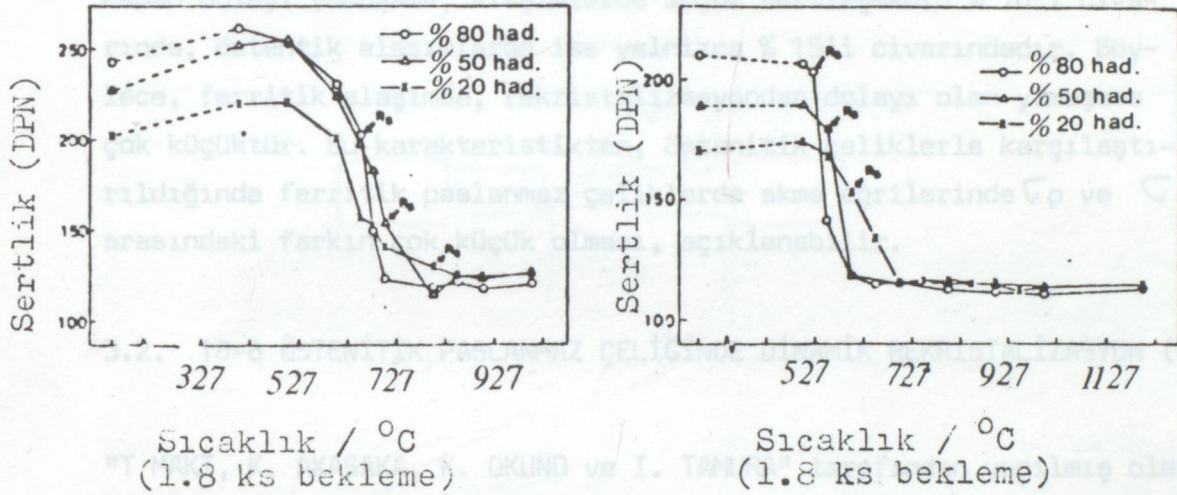
Şekil 26, Z deformasyon şartında dinamik rekristalize olmuş ferritin ortalama tane büyüklüğündeki ($\bar{D}$) değişimi göstermektedir; Z, Zenner-hollomon parametresidir ($Z = \dot{\epsilon} \exp (Q/RT)$) Mevcut çelik için $Q=225$ kcal/mol alınarak belirlenmiştir. Dinamik rekristalize edilmiş östenitik çeliklerin taneleri için olduğu gibi aynı şekilde $\bar{D} = AZ^{-P}$ eşitliğinin geçerliliği görülmektedir.

Keane, Sellars ve Tegart (1968) ticari saf demir için tek iyileşme işleminin dinamik toparlama olduğunu ve "zone refined iron"da dinamik rekristalizasyon meydana geldiğini saptamışlardır. Glover ve Sellars (1973) vakumda ergitilmiş demir ve zone refined iron'da akma gerilmesinin kritik değerden küçük olduğu belirli şartlar altında ferritte dinamik rekristalizasyon olduğunu da saptamışlardır; vakumla ergitilmiş demir ile karşılaştırıldığında zone refined iron'da dinamik rekristalizasyon daha yüksek

z değerlerinde (yani daha düşük sıcaklık) meydana gelmektedir. Bu sonuçlar demirin saflığının dinamik rekristalizasyon olayını kuvvetli biçimde etkilediğini gösterir, yani, katıksı miktarının artmasıyla rekristalizasyon sıcaklığı da artar. Bu yüzden, ticari saf demirde bile, numuneler daha yüksek sıcaklıklarda deforme edildiklerinde dinamik rekristalizasyon olanağı yükseltir. Bununla birlikte ticari saf demirde, çok yüksek sıcaklıklarda ferritin deformasyonu $\alpha \rightarrow \gamma$ dönüşümü nedeniyle olanaksızdır. Ferritin çok yüksek sıcaklıklara kadar kararlı olduğu % 16 Cr'lu ferritik çeliklerde $\epsilon \div 0.4$ değerine deforme edildiklerinde 1000 °C'de dinamik rekristalizasyon oluşur. İyileşme mekanizmasının dinamik toparlanmadan dinamik rekristalizasyona dönüştüğü (Z azaltıldığı zaman) % 0.06 C'lu çeliklerde ve yüksek saflıkta demirde de aynı eğilim vardır. % 25 Cr'lu ferritik çeliklerde sıcak deformasyon sırasında dinamik rekristalizasyon meydana gelmediği de bildirilmiştir. (Jonas, Tagart, Sellars 1969). Bununla birlikte, bu, mevcut sonuçlarla 'zorunlu uyumsuz' değildir. Cr ilavesi rekristalizasyon sıcaklığını yükselttiğinden % 25 Cr'lu çelikte dinamik rekristalizasyon oluşması % 16 Cr'lu çelikte kıyaslandığında, daha zor olmalıdır. Bundan dolayı, % 25 Cr'lu ferritik çelikte daha çok yüksek sıcaklıklardaki deformasyon koşullarında dinamik rekristalizasyon oluşması olasılığı vardır.

Şekil 23 ve 25'den görülebileceği gibi akma eğrileri σ_p ve σ_s arasında çok küçük bir fark sergiler. Dolayısıyla, ilk bakışta, bu akma eğrileri, iyileşme işleminin yalnızca dinamik toparlanma olduğu Al adı verilen eğri tipine ait görülür. Bununla birlikte, böyle eğrilerde bile, mikroyapısal incelemeler sunulan çelikte dinamik rekristalizasyon meydana geldiğini göstermiştir. Östenitte dinamik rekristalizasyon durumunda pik gerilmeden sonra akma geriliminin düşmesi açıkça görülmüştür. (Maki, Akasaka, Tamura, 1981) Bu farklılık ferrit ve östenit arasındaki rekristalizasyon işlemi sırasında toparlanmanın yumuşamaya yardımının farkıyla ilişkili olmalıdır. Bunu kuvvetlendirmek için yukarıda tanımlanan sıcak deformasyon için kullanılan farklı olarak 900°C civarında östenit oluşumu meydana gelmeyen % 18.6. Cr % 0.002 C-Fe alaşımı kullanılarak statik rekristalizasyon davranışı incelenmiştir. Şekil 27, % 20;50; veya 80 oranında soğuk

haddelenmiş numunelerde tavlama sıcaklığı ile sertlikteki değişimi göstermektedir. R_p , mikroyapısal incelemeler tarafından belirlenmiş olan statik rekristalizasyon başlama sıcaklığını göstermektedir. Kıyasla-
ma için, Fe - % 35 Ni alaşımında östenitin sonuçları şekil 39'da gösterilmiştir. Toparlanmadan dolayı olan yumuşamanın büyük bir mik-
terinden sonra rekristalizasyon olması ferritik alaşımların bir ka-
rakteristiğidir, toparlanmadan dolayı olan yumuşama östenitin alaşımlar-
larda çok küçüktür. Ürneğin, % 50 haddelenmiş numunelerde, toparlan-



a) Fe-% 18 Cr ferritik alaşım b) Fe-% 35 Ni östenitik alaşım

Şek.27. Soğuk haddelenmiş numunelerin oda sıcaklığındaki sertliği üzerinde tavlama sıcaklığının etkisi.

inceleme etkisi ve sertleştirme etkisi (oda sıcaklığı sertliği) de in-
celenmiştir.

Bu çalışmada kullanılan malzemeler ve deneyler süreci aşağıdaki gibidir. Kullanılan 304 paslanmaz çelik için kimyasal bileşimi tablo 2'de gösterilmiştir. 10 mm uzunluğundaki ince tavlama bilyesi sahip çelik numuneleri şekil 28'de görülmektedir. Şekil 29 numunelerin çekme testleri ve ısıtma işlem koşullarını göstermektedir. Oda sıcaklığında bile östenit tek fazında bulunan paslanmaz çelik numuneler bir vakum fırınında 1200°C-1300°C arasındaki sıcaklıklarda ısıtılmış östenit fazı büyüklüğü 75-250 µm olacak şekilde yağda ani soğutulmuştur.

haddelenmiş numunede tavlama sıcaklığı ile sertlikteki değişmeyi göstermektedir. R_s , mikroyapısal incelemeler tarafından belirlenmiş olan statik rekristalizasyon başlama sıcaklığını göstermektedir. Kıyaslama için, Fe - % 35 Ni alaşımında östenitin sonuçları şekil 39'b de gösterilmiştir. Toparlanmadan dolayı olan yumuşamanın büyük bir miktarından sonra rekristalizasyon olması ferritik alaşımların bir karakteristiğidir, toparlanmadan dolayı olan yumuşama östenitin alaşımlarda çok küçüktür. Örneğin, % 50 haddelenmiş numunelerde, toparlanmadan dolayı yumuşama, alaşımlarda soğuk sertleşmenin % 70'i civarında, östenitik alaşımlarda ise yalnızca % 15'i civarındadır. Böylece, ferritik alaşımda, rekristalizasyondan dolayı olan yumuşama çok küçüktür. Bu karakteristikten, östenitik çeliklerle karşılaştırıldığında ferritik paslanmaz çeliklerde akma eğrilerinde σ_p ve σ_s arasındaki farkın çok küçük olması, açıklanabilir.

3.2. 18-8 ÖSTENİTİK PASLANMAZ ÇELİĞİNDE DİNAMİK REKRİSTALİZASYON (8)

"T MAKİ, K. AKASAKA, K. OKUNO ve I. TAMURA" tarafından yapılmış olan aşağıdaki incelemenin amacı 18-8 paslanmaz çeliğinde deformasyon koşullarının (T , $\dot{\epsilon}$ ve ϵ) ve başlangıç tane büyüklüğünün, östenitin dinamik rekristalizasyon davranışı üzerindeki etkisini açıklamaktır. Aynı zamanda östenitin dinamik rekristalizasyon ile meydana gelen tane inceleme etkisi ve sertleştirme etkisi (oda sıcaklığı sertliği) de incelenmiştir.

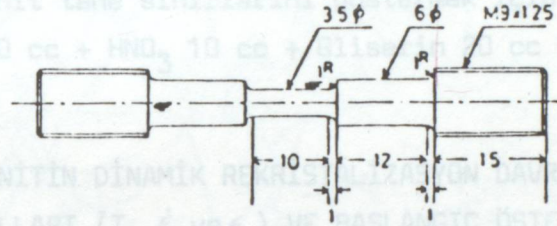
Bu çalışmada kullanılan malzemeler ve deneysel süreç aşağıdaki gibidir. Kullanılan 304 paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimi tablo 2'de gösterilmiştir. 10 mm uzunluğundaki inceltirilmiş ölçme kesitine sahip çekme numuneleri şekil 28'de görülmektedir. Şekil 29 numunelerin çekme testleri ve ısıtma işlem koşullarını göstermektedir. Oda sıcaklığında bile östenit tek fazında bulunan paslanmaz çelik numuneler bir vakum fırınında 1200°C - 1300°C arasındaki sıcaklıklarda ısıtılmış östenit tane büyüklüğü 76-250 μm olacak şekilde yağda ani soğutulmuştur.

Bu numuneler bir Instron tipi çekme makinesi ile, 1000-1200°C arasındaki değişik sıcaklıklarda ve $1.7 \times 10^{-3} - 1.7 \times 10^{-1} s^{-1}$ lik gerinim hızlarında deforme edilmislerdir. Çekme numuneleri N₂ veya % 90 N₂ + % 10 H₂ atmosferi içinde 1000-1200°C'de ısıtılmışlardır.

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	
18-8	0.050	0.53	1.07	0.029	0.003	9.14	18.42	0.09	Cu:0.05 N:0.038 Co:8.57 Ti:0.72 Al:0.063

Tablo 2: Kullanılan çeliğin bileşimi.

Numuneler, değişik gerinimlerdeki deformasyonlardan sonra hemen su sıkılarak hızlı bir şekilde (0.5 saniye içinde) soğutulmuşlardır. Mikroyapı, numunelerin çekme doğrultusu boyunca düz kesit alınarak optik mikroskop ile incelenmiştir. Östenit tane sınırlarını göstermek için paslanmaz çelik numuneler HF 20 cc + HNO₃ 10 cc + H₂O 10 cc çözeltisi ile boyanmıştır.



3.2.1. ÖSTENİTİN DİNAMİK REKRİSTALİZASYONUNUN GERİNİM HIZI ÜZERİNDE DEFORMASYON KOŞULLARI (T, $\dot{\epsilon}$ ve ϵ) VE BAŞLANGIÇ ÖSTENİT TANE BÜYÜKLÜĞÜNÜN

Sek. 28. Çekme numunesinin boyutları (mm).

Sekil 30, 1100°C'de $1.7 \times 10^{-2} s^{-1}$ gerinim hızı değerinde ve değişik gerinimlerde deforme edilen paslanmaz çelikte Östenitin ($D_0 = 150 \mu m$) dinamik rekristalizasyonu ile oluşan mikroyapısal değişim görülmektedir.

Östenitin testten önce $1200-1300^\circ C$ sıcaklığında bir çok tavlama ikizli içeren eşkeşilli tanelerle deforme edilmiştir. Deformasyonun pik gerilmeye kadar olan ilk aşamasında orijinal tanelerinde çıkıntılar gözlenir. (30 b). Pik gerilme civarında ise tanelerinde ince dinamik rekristalizasyon taneleri, tanelerinde Östenit tane sınırlarında ve ikiz sınırlarında oluşur (30 c). Gerinim daha da artırılmasıyla, dinamik rekristalizasyon taneleri ve sınırları orijinal Östenit taneleri tamamen yerini alırlar ve sonuçta orijinal Östenit taneleri tamamen yok olur. (30 d). Dinamik rekristalizasyon taneleri ve sınırları tanelerle yer değiştirirler (30 e). Dinamik rekristalizasyon taneleri ve sınırları tanelerle yer değiştirirler (30 f). Dinamik rekristalizasyon taneleri ve sınırları tanelerle yer değiştirirler (30 g). Dinamik rekristalizasyon taneleri ve sınırları tanelerle yer değiştirirler (30 h). Dinamik rekristalizasyon taneleri ve sınırları tanelerle yer değiştirirler (30 i). Dinamik rekristalizasyon taneleri ve sınırları tanelerle yer değiştirirler (30 j). Dinamik rekristalizasyon taneleri ve sınırları tanelerle yer değiştirirler (30 k). Dinamik rekristalizasyon taneleri ve sınırları tanelerle yer değiştirirler (30 l). Dinamik rekristalizasyon taneleri ve sınırları tanelerle yer değiştirirler (30 m). Dinamik rekristalizasyon taneleri ve sınırları tanelerle yer değiştirirler (30 n). Dinamik rekristalizasyon taneleri ve sınırları tanelerle yer değiştirirler (30 o). Dinamik rekristalizasyon taneleri ve sınırları tanelerle yer değiştirirler (30 p). Dinamik rekristalizasyon taneleri ve sınırları tanelerle yer değiştirirler (30 q). Dinamik rekristalizasyon taneleri ve sınırları tanelerle yer değiştirirler (30 r). Dinamik rekristalizasyon taneleri ve sınırları tanelerle yer değiştirirler (30 s). Dinamik rekristalizasyon taneleri ve sınırları tanelerle yer değiştirirler (30 t). Dinamik rekristalizasyon taneleri ve sınırları tanelerle yer değiştirirler (30 u). Dinamik rekristalizasyon taneleri ve sınırları tanelerle yer değiştirirler (30 v). Dinamik rekristalizasyon taneleri ve sınırları tanelerle yer değiştirirler (30 w). Dinamik rekristalizasyon taneleri ve sınırları tanelerle yer değiştirirler (30 x). Dinamik rekristalizasyon taneleri ve sınırları tanelerle yer değiştirirler (30 y). Dinamik rekristalizasyon taneleri ve sınırları tanelerle yer değiştirirler (30 z).

(a) 18-8 Paslanmaz Çelik
(Çözeltiye Alma)

1200-1300°C

Çekme Testi

1000-1200°C

$1.7 \times 10^{-3} s^{-1}$

$1.7 \times 10^{-1} s^{-1}$

Y.S.

S.S.

D. (μm)	Çözeltiye Alma
76	1200°C 15 dak.
150	1250°C 30 dak.
250	1300°C 30 dak.

Sek. 29. 18 - 8 paslanmaz çeliği için ısıtılma işlem ve test koşulları.

Bu numuneler bir Instron tipi çekme makinası ile, 1000-1200°C arasındaki değişik sıcaklıklarda ve $1.7 \times 10^{-3} - 1.7 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ lik gerinim hızlarında deforme edilmişlerdir. Çekme numuneleri N_2 veya % 90 N_2 + % 10 H_2 gaz atmosfer içerisinde indüksiyon ile ısıtılmışlardır.

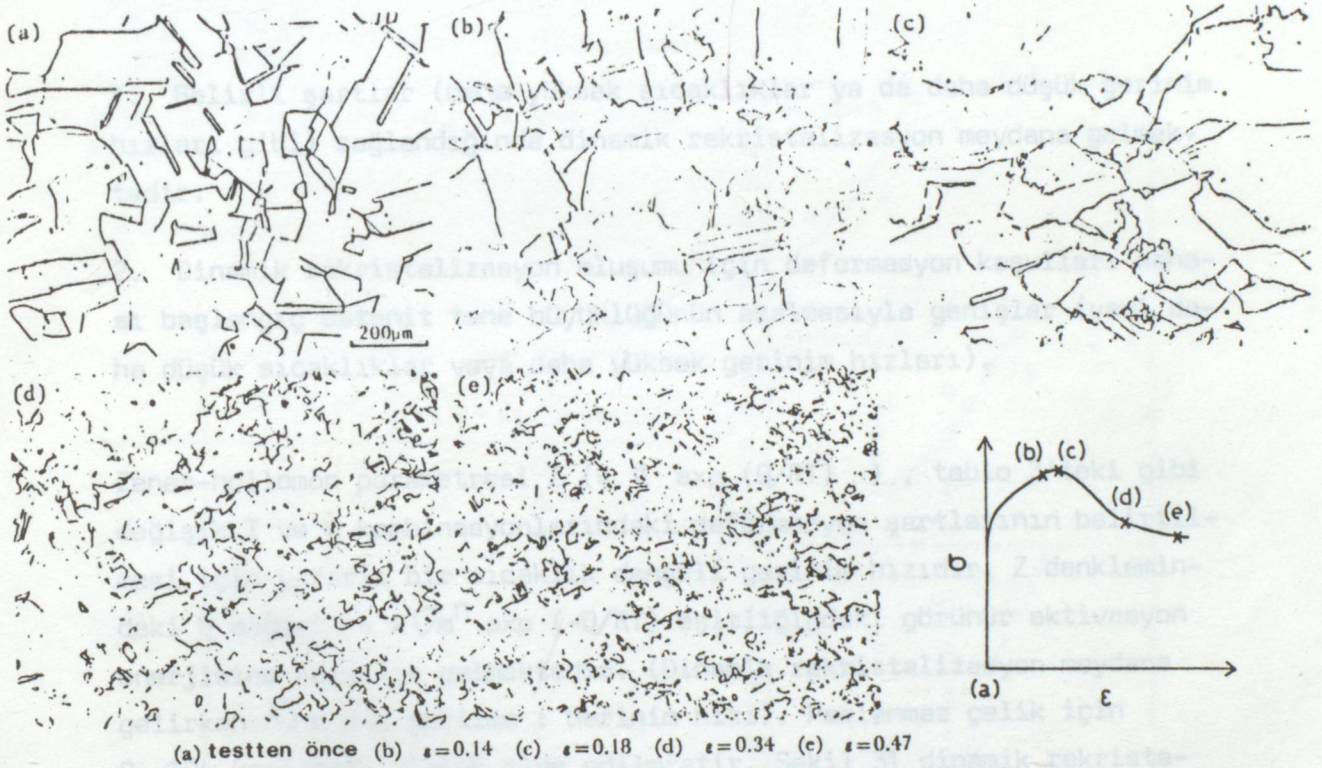
Sıcak deformasyon esnasındaki mikroyapısal değişimi gözlemlemek ve oda sıcaklığında sertliği ölçmek için, numuneler, değişik gerinimlerdeki deformasyonlardan sonra hemen su sıkılarak hızlı bir şekilde (0.5 saniye içinde) soğutulmuşlardır. Mikroyapı, numunelerin çekme doğrultusu boyunca düz kesit alınarak optik mikroskopi ile incelenmiştir. Östenit tane sınırlarını göstermek için, paslanmaz çelik numuneler HF 20 cc + HNO_3 10 cc + Gliserin 20 cc çözeltisi ile dağlanmıştır.

3.2.1. ÖSTENİTİN DİNAMİK REKRİSTALİZASYON DAVRANIŞI ÜZERİNDE DEFORMASYON KOŞULLARI (T , $\dot{\epsilon}$ ve ϵ) VE BAŞLANGIÇ ÖSTENİT TANE BÜYÜKLÜĞÜNÜN (D_0) ETKİSİ

Şekil 30, 1100°C'de $1.7 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızı değerinde ve değişik gerinimlerde deforme edilen paslanmaz çelikte östenitin ($D_0 = 150 \mu\text{m}$) dinamik rekristalizasyonu ile oluşan mikroyapısal değişim görülmektedir. Östenitin testten önceki başlangıç yapısı bir çok tavlama ikizi içeren eşeksenli tanelerdir. (30 a). Deformasyonun pik gerilmeye kadar olan ilk aşamasında orijinal tane sınırlarında çıkıntılar gözlenir. (30 b). Pik gerilme civarında deformasyon olduğunda ince dinamik rekristalize olmuş taneler, tercihen orijinal östenit tane sınırlarında ve ikiz sınırlarında oluşurlar (30 c). Gerinim daha da artırılmasıyla, dinamik rekristalizasyon ilerler ve sonuçta orijinal östenit taneleri tamamen yeni rekristalize tanelerle yer değiştirirler (30 d). Dinamik rekristalizasyon bir kere tamamlandığında hemen kararlı akma gerilmesi elde edilir. Ve östenitin mikroyapısı ile tane büyüklüğü kararlı sahada her gerinimde hemen hemen sabittir. Bu durum 30 d ve 30 e'den görülebilir.

Şekil 30'dan da görüleceği gibi dinamik rekristalizasyon oluşumu için bir kritik gerinim vardır. Bu da göstermektedir ki, deformasyon sıcaklığı ve gerinim hızına ek olarak gerinim (ϵ) de dinamik rekristalizasyon davranışını etkileyen önemli faktörlerden biridir.

Farklı deformasyon sıcaklığı (T) ve gerinim hızı ($\dot{\epsilon}$) değerinde ($\epsilon = 0.3$ civarında hemen hemen sabit) değişik deformasyon koşulları altında metaldeki yapısal değişim incelenmiş, sonuçlar tablo 3'te özetlenmiştir.



Şek.30. 18 -8 paslanmaz çeliğinde ($D = 150 \mu m$) gerinim ile östenitin dinamik rekristalizasyonunun gelişimini gösteren optik mikyografılar. $1100^\circ C$ ve $\dot{\epsilon} = 1.7 \times 10^{-1} / s$ de değişik gerinimlere deforme edilmiş, ardından ağı soğutulmuştur. Dağlama ; HF 2 : HNO₃ 1 : Gliserin 2

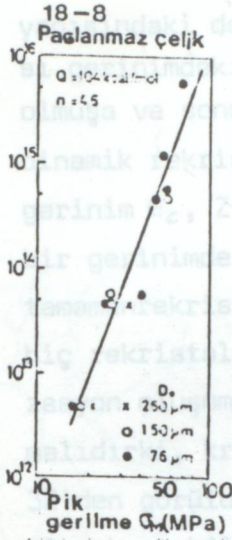
Şekil 30'dan da görüleceği gibi dinamik rekristalizasyon oluşumu için bir kritik gerinim vardır. Bu da göstermektedir ki, deformasyon sıcaklığı ve gerinim hızına ek olarak gerinim (ϵ) de dinamik rekristalizasyon davranışını etkileyen önemli faktörlerden biridir.

Farklı deformasyon sıcaklığı (T) ve gerinim hızı ($\dot{\epsilon}$) değerinde ($\epsilon = 0.5$ civarında hemen hemen sabit) değişik deformasyon koşulları altında östenitteki yapısal değişim incelenmiş, sonuçlar tablo 3'te özetlenmiştir.

1. Belirli şartlar (daha yüksek sıcaklıklar ya da daha düşük gerinim hızları gibi) sağlandığında dinamik rekristalizasyon meydana gelmektedir.
2. Dinamik rekristalizasyon oluşumu için deformasyon koşulları sahası başlangıç östenit tane büyüklüğünün azalmasıyla genişler (yani daha düşük sıcaklıklar veya daha yüksek gerinim hızları).

Zener-hollomon parametresi $Z (= \dot{\epsilon} \exp (Q/RT))$, tablo 3'teki gibi değişik T ve $\dot{\epsilon}$ kombinasyonlarındaki deformasyon şartlarının belirtilmesi için yararlı bir sıcaklık dengeli gerinim hızıdır. Z denklemindeki Q değeri $\dot{\epsilon} = A \sigma_m^n \exp (-Q/RT)$ eşitliğindeki görünür aktivasyon enerjisine karşılık gelmektedir. (Dinamik rekristalizasyon meydana gelirken σ_m pik gerilme : Gerinim hızı). Paslanmaz çelik için $Q = 104$ kcal/mol, olarak elde edilmiştir. Şekil 31 dinamik rekristalizasyondan ortaya çıkan pik akma gerilmesi (σ_m) ve Z arasındaki ilişkiyi göstermekte, $Z = A \cdot \sigma_m^n$ bağıntısının hemen hemen yeterli olduğunu belirtmektedir. Gerilme üsteli n şekil 31'deki eğimden elde edilmiştir. (paslanmaz çelik için 4.6)

Şekil 32'de Z deformasyon şartı ile sıcak deforme edilmiş östenitin



Şek. 31. 18-8 paslanmaz

çeliğinde dinamik rekristalizasyon nedeniyle oluşan pik akma gerilmesi (σ_M) ile Zener-Hollomon parametresi (Z) arasındaki ilişki.

$\dot{\epsilon} = 0.5$

	D_0	T (°C)	$\dot{\epsilon}$ (s ⁻¹)		
			1.7×10^{-3}	1.7×10^{-2}	1.7×10^{-1}
18-8 Paslanmaz Çelik	250 μm (1 300 °C 30 dak.)	1 200	○	○	△
		1 100	△	△	x
		1 000	x	x	x
	150 μm (1 250 °C 30 dak.)	1 200	○	○	○
		1 100	○	○	△
		1 000	△	x	x
	76 μm (1 200 °C 15 dak.)	1 200	○	○	○
		1 100	○	○	○
		1 000	○	△	△

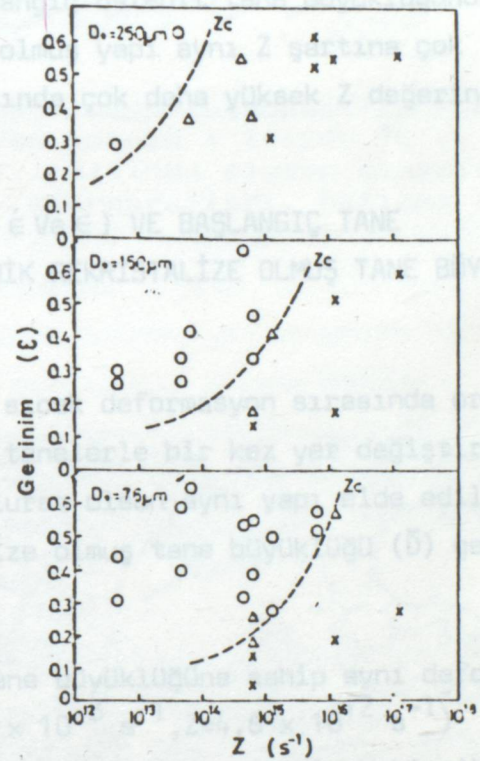
D_0 : başlangıç östenit tane büyüklüğü

○: tamamen dinamik rekristalize olmuş östenit

△: kısmen dinamik rekristalize olmuş östenit

x: rekristalize olmamış östenit

Tablo 3. Farklı T ve birleşimli değişik deformasyon koşulları altında 0.5 civarında gerinime deforme edilmiş 18-8 paslanmaz çeliğinin deformasyon yapısının özeti



○: Tamıyla dinamik rekristalize olmuş östenit

△: Kısmen dinamik rekristalize olmuş östenit

x: Rekristalize olmamış östenit

Şek. 32. Farklı başlangıç östenit

tane büyüklüğünde (D_0)-18-8 paslanmaz çeliğinde östenitin yüksek sic. deformasyon yapısı ve deformasyon koşulları (Z ve $\dot{\epsilon}$) arasındaki ilişki

yapısındaki değişimin özetidir. Verilen bir Z' 'de östenitin yapısı gerinimdeki artmayla rekristalize olmamıştan kısmen rekristalize olmuş ve sonuçta tamamen rekristalize olmuş doğru değişir. Tamamen dinamik rekristalize olmuş bir yapı elde etmek için gerekli kritik gerinim ϵ_c , Z' 'deki artmayla artar. Bunun tersine, numuneler belirli bir gerinimde deforme edildiklerinde Z' 'deki artmayla östenit yapısı tamamen rekristalize olmuştan kısmen rekristalize olmuş ve sonuçta hiç rekristalize olmamışa doğru değişir. Buradan, dinamik rekristalizasyon oluşumu için üst kritik Z (Z_c) değeri vardır. Şu da vurgulanmalıdır ki, kritik Z_c deformasyon miktarına bağlıdır; yani, şekil 32'den görüldüğü gibi Z_c , gerinim miktarının artmasıyla artar. İlave olarak, şekil 32'de olduğu gibi başlangıç östenit tane büyüklüğündeki azalmayla, dinamik rekristalize olmuş yapı aynı Z şartına çok daha küçük gerinimde veya aynı şartında çok daha yüksek Z değerinde elde edilir.

3.2.2. DEFORMASYON KOŞULLARININ (T - $\dot{\epsilon}$ ve ϵ) VE BAŞLANGIÇ TANE BÜYÜKLÜĞÜNÜN ÖSTENİTİN DİNAMİK REKRİSTALİZE OLMUŞ TANE BÜYÜKLÜĞÜ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

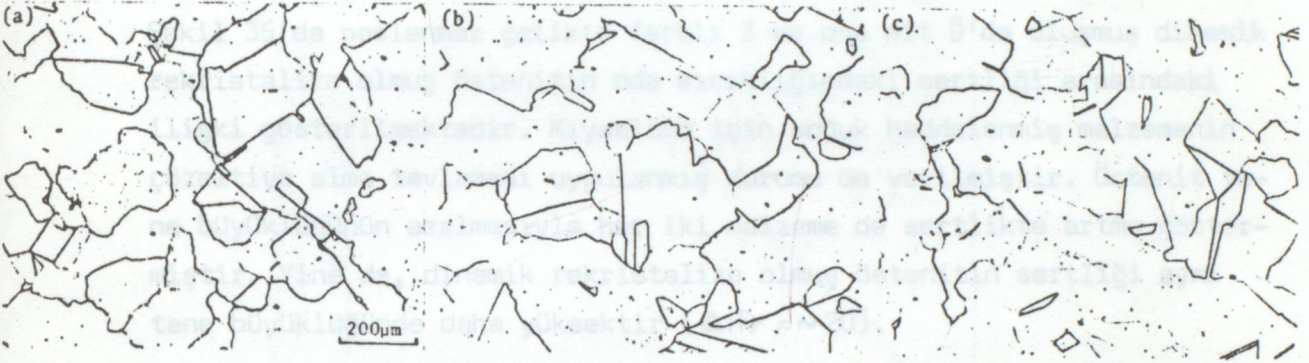
Şekil 30 d, 30 e'de görüldüğü gibi, sıcak deformasyon sırasında orjinal taneler yeni rekristalize olmuş tanelerle bir kez yer değiştirince, bundan sonraki deformasyon ne olursa olsun aynı yapı elde edilir. Öyleyse, ortalama dinamik rekristalize olmuş tane büyüklüğü ($\bar{D}$) gerinime (ϵ) bağımlı değildir.

Şekil 33 farklı başlangıç östenit tane büyüklüğüne sahip aynı deformasyon şartlarında ($T=1200^\circ\text{C}$, $\dot{\epsilon}=1.7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, $Z=4.6 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$) oluşturulmuş dinamik rekristalize olmuş paslanmaz çeliklerdeki mikro yapıları göstermektedir. Baştaki farklı tane büyüklüklerine rağmen sonuçtaki mikroyapı ve tane büyüklüğü birbirlerine çok benzerdir. Bu da göstermektedir ki, dinamik rekristalize olmuş tane büyüklüğü ($\bar{D}$) başlangıçtaki tane büyüklüğüne (D_0) bağlı değildir ve yalnızca Z deformasyon şartı tarafından belirlenir.

Şekil 34'da paslanmaz çelikte değişik Z şartları altında oluşmuş dinamik rekristalize olmuş östenit yapısı vardır. ($D_0 = 76 \mu\text{m}$). Z 'nin artmasıyla $\bar{D}$ 'nin azaldığı görülmektedir. Paslanmaz çelik için $\bar{D}$ ve Z

arasındaki ilişki $\log D$ ve $\log Z$ arasında kurulmuştur, bu eşitlik diğer araştırmacılar tarafından da (D ve Z arasında) açıklanmıştır. n değeri 2,4'tür. (Şekil 35)

3.2.3. DİNAMİK REKRİSTALİZASYONUN SICAK İÇİNDENKİ SERTLİĞİ



Şek.33. Farklı başlangıç östenit tane büyüklüğündeki 18 - 8 paslanmaz çeliğinde aynı deformasyon koşulu ($T=1200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}=1.7 \times 10^{-3}\text{ /s}$, $Z=4.6 \times 10^{12}\text{ /s}$) altında oluşan dinamik rekristalize olmuş östenitin optik mikrografları. Dağlama; HF 2 : HNO_3 1 : Gliserin 2. (örneğin tane inceltme- si), sıcak işlenebilirlik, sıcak deformasyon direnci vb. ile sıkıca ilişkili olduğu için, uygulamadaki sıcak deformasyon işleminde dinamik rekristalizasyon meydana gelip gelmediğini bilmek önemlidir.



- (a) $Z=6.1 \times 10^{15}\text{ s}^{-1}$ ($T=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}=1.7 \times 10^{-1}\text{ s}^{-1}$, $\epsilon=0.52$)
- (b) $Z=4.6 \times 10^{14}\text{ s}^{-1}$ ($T=1200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}=1.7 \times 10^{-1}\text{ s}^{-1}$, $\epsilon=0.32$)
- (c) $Z=4.6 \times 10^{13}\text{ s}^{-1}$ ($T=1200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}=1.7 \times 10^{-1}\text{ s}^{-1}$, $\epsilon=0.40$)

Şek.34. 18 - 8 paslanmaz çeliğinde farklı Z deformasyon koşulu altında oluşan dinamik rekristalize olmuş östenitin optik mikrografları ($D = 76\text{ }\mu\text{m}$). Dağlama; HF 2 : HNO_3 1 : Gliserin 2.

İle görülen eğilime (Şekil 30) bağlı olarak bir karakteristiktir. Z arttıkça D azalır. Dinamik rekristalizasyon ile östenit tane inceltmesi yalnızca istendiğinde mümkün olan en yüksek bir Z ile

arasındaki ilişki $\log \bar{D}$ ve $\log Z$ arasında kurulmuştur, bu eşitlik diğer araştırmacılar tarafından da ($\bar{D}$ ve Z arasında) açıklanmıştır. M değeri 2,4'tür. (Şekil 35)

3.2.3. DİNAMİK REKRİSTALİZE OLMUŞ YAPININ ODA SICAKLIĞINDAKİ SERTLİĞİ

Şekil 36'da paslanmaz çelikte farklı Z ve ona ait $\bar{D}$ 'da oluşmuş dinamik rekristalize olmuş östenitin oda sıcaklığındaki sertliği arasındaki ilişki gösterilmektedir. Kıyaslama için soğuk haddelenmiş malzemenin çözeltiliye alma tavlaması uygulanmış durumu da verilmiştir. Östenit tane büyüklüğünün azalmasıyla her iki malzeme de sertlikte artma göstermiştir. Yine de, dinamik rekristalize olmuş östenitin sertliği aynı tane büyüklüğünde daha yüksektir ($\Delta H_v \approx 20$).

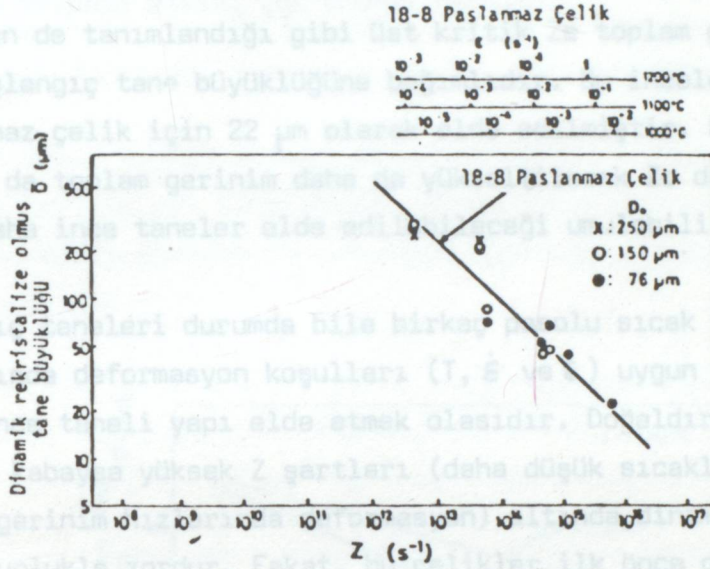
3.2.4. ÖSTENİTİN DİNAMİK REKRİSTALİZASYON OLUŞUMU İÇİN DEFORMASYON ŞARTLARI

Dinamik rekristalizasyon mikroyapının gelişimi (örneğin tane incelmesi), sıcak işlenebilirlik, sıcak deformasyon direnci vb. ile sıkıca ilişkili olduğu için, uygulamadaki sıcak deformasyon işleminde dinamik rekristalizasyon meydana gelip gelmediğini bilmek önemlidir. Bunun için, çeşitli çeliklerde dinamik rekristalizasyon oluşumu için deformasyon koşulları T , $\dot{\epsilon}$ ve ϵ olmak üzere üç faktörün fonksiyonu olarak tanımlandı. Daha önceki literatürler yalnızca T ve ϵ 'u dikkate almışlardır.

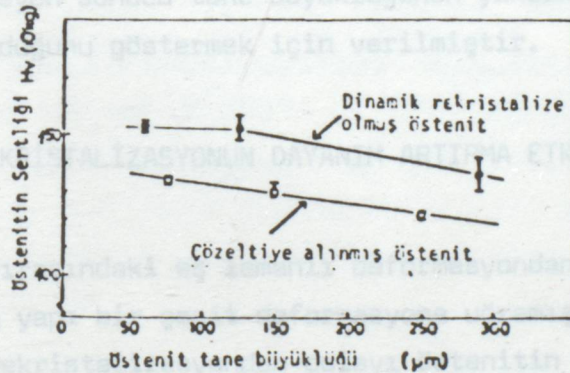
Başlangıç tane büyüklüğü dinamik rekristalizasyon oluşumunu etkileyen önemli malzeme etkenidir. Dinamik rekristalizasyonun, aynı Z şartında başlangıç tane büyüklüğünün azalmasıyla daha küçük gerinimlerde oluşmaya başladığı önceden de belirtilmiştir. Aynı eğilim bu incelemede de şekil 32'de gösterilmiştir.

3.2.5. DİNAMİK REKRİSTALİZASYON SONUCU ÖSTENİT TANE BÜYÜKLÜĞÜ İNCELEMESİ

$\bar{D}$ 'nin yalnızca Z tarafından belirlenmesi ve D_0 (şekil 33 ve şekil 35) ile gerinim miktarına (şekil 30) bağlı olmaması bir karakteristiktir. Z arttıkça $\bar{D}$ azalır. Dinamik rekristalizasyon ile östenit tane inceltmesi yapılmak istendiğinde numune mümkün olduğunca yüksek bir Z ile



Şek.35. 18 -8 paslanmaz çeliğinde dinamik rekristalize olmuş östenit tane büyüklüğü ($\bar{D}$) ile Z arasındaki ilişki.



Şek.36. 18 -8 paslanmaz çeliğinde dinamik rekristalize olmuş östenitin sertliği ile çözüme tavlama uygulanmış östenitin sertliğinin karşılaştırılması.

deforme edilmesi arzulanabilir. Fakat numuneler Z_c 'den daha yüksek şartlarda deforme edildiklerinde dinamik rekristalize olmuş yapı elde edilemez. Önceden de tanımlandığı gibi üst kritik Z_c toplam gerinim miktarına ve başlangıç tane büyüklüğüne bağlıdır. Bu incelemede en küçük $\bar{D}$ paslanmaz çelik için $22 \mu m$ olarak elde edilmiştir. Fakat D_0 düşürülerek ya da toplam gerinim daha da yükseltilerek Z_c daha da yükseltilirse daha ince taneler elde edilebileceği umulabilir.

Kaba başlangıç taneleri durumda bile birkaç pasolu sıcak şekillendirme işlemi sırasında deformasyon koşulları (T , $\dot{\epsilon}$ ve ϵ) uygun kontrol edilirse sonuçta ince taneli yapı elde etmek olasıdır. Doğaldır ki, başlangıç taneleri çok kabaysa yüksek Z şartları (daha düşük sıcaklıklarda ya da daha yüksek gerinim hızlarında deformasyon) altında dinamik rekristalizasyon çoğunlukla zordur. Fakat, bu çelikler ilk önce düşük Z ile deforme edilirse dinamik rekristalizasyon gerçekleştirilebilir ve östenit taneleri başlangıçtakinden daha küçük olur.

Alaşım elementlerinin $\bar{D}$ üzerindeki etkisi henüz açıklanamamıştır. Şekil 37, şekil 35'deki lineer ilişkiden türetilen, $1100^\circ C$ 'de $\dot{\epsilon}$ ile $\bar{D}$ 'nin değişimini paslanmaz çelik için vermektedir. 0.16 C'lu çelik, dinamik rekristalizasyon sonucu tane büyüklüğünün yüksek alaşımlı çelikte daha önce olduğunu göstermek için verilmiştir.

3.2.6. DİNAMİK REKRİSTALİZASYONUN DAYANIM ARTIRMA ETKİSİ

Rekristalizasyon sırasındaki eş zamanlı deformasyondan dolayı, dinamik rekristalize olmuş yapı bir çeşit deformasyona uğramış yapıdır. Bu incelemede dinamik rekristalizasyondan dolayı östenitin dayanım kazanması 18-8 paslanmaz çelik için teyit edilmiştir. Fakat şekil 36'da görüldüğü gibi sertlikteki artış çok büyük değildir. ($\Delta Hv: \sim 20$) Referans için 18-8 paslanmaz çelik soğuk haddelenerek östenitteki sertlik değişimi incelenmiştir. % 10 küçültme için oda sıcaklığındaki sertlik

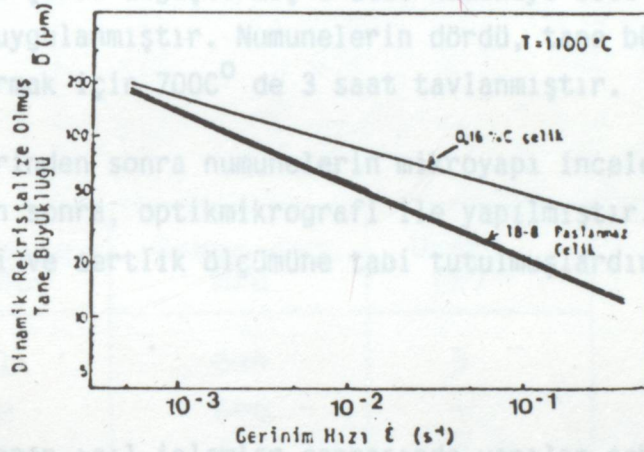
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

artımı $\Delta Hv:60$, % 20 küçültme içinde $\Delta Hv:130$ olmuştur. Öyleyse 18-8 çeliği için rekristalizasyon sonucu sertlik artımı soğuk haddelenmeye göre % 5 civarındadır. Bundan dolayı dinamik rekristalizasyon sonucu dayanım kazanma etkisi çok önemli değildir.

Soğuk haddelenmiş olarak alınan bu malzemelere ilk önce çekme testi uygulanmış ve sertlikleri ölçülmüştür. Deney sonuçları tablo 5'dedir. Bu malzemelerin haddelenmeden önceki çekme dayanımı 370 MPa ve uzaması % 39 olarak bulunmuştur.

Farklı oranlarda şekil değiştirmiş 6 adet numuneye 500°C , 600°C ve 700°C 1 saat tavlama uygulanmıştır. Numunelerin dördü büyümesi olup olmadığını araştırarak 700°C de 3 saat tavlama yapılmıştır.

Tavlama işlemlerinden sonra numunelerin metalografik incelemesi, % 2 Nital ile boyandıktan sonra optik mikroskopla ve yarı otomatik olarak yapılmıştır. Ayrıca bu numuneler çekme testi için uygun boyutlara getirilmiştir.



4.2. BULGULAR

Numuneler uygulanan ısıtma işlemleri sonrasında yapılan çekme testi sonuçları tablo 6'dadır.

Şek.37. 1100°C sıcaklık ve $10^{-3} \sim 10^{-1}$ /s gerinim hızında deforme edilen 18 - 8 paslanmaz çelik ve % 0.16 C 'lu çeliklerin dinamik rekristalize olmuş östenit tane büyüklüklerinin karşılaştırılması. (Şekil 38). Bu arada malzemenin uzama değeri tavlama sıcaklığının artırılması ile giderek artmış, 700°C de 1 saatlik tavlama ile en yüksek değere ulaşmış ve bu sıcaklıkta 3 saatlik bekleme sonucunda tekrar düşme meydana gelmiştir (Şekil 39).

Isıl işlem sonrası sertlik ölçümü sonuçları tablo 7'dedir. İşlem sıcaklığının artmasıyla birlikte sertlikte düşme olduğu ve 700°C de 3 saatlik bekleme sonucunda en düşük değere geldiği görülmektedir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. MALZEMELER VE DENEYSEL SÜREÇ

Yapılan deneysel çalışmalarda değişik deformasyon dereceleri ve değişik çaplarda düşük karbonlu (St 37) çelik teller kullanılmıştır. Tellerin boyutları ve deformasyon dereceleri tablo 4'de verilmiştir.

Soğuk haddelenmiş olarak alınan bu malzemelere ilk önce çekme testi uygulanmış ve sertlikleri ölçülmüştür. Deney sonuçları tablo 5'dedir. Bu malzemelerin haddelenmeden önceki çekme dayanımı 370 MPa ve uzaması % 39 olarak bulunmuştur.

Farklı oranlarda şekil değiştirmiş 6 adet numuneye 500C⁰, 600C⁰ ve 700C⁰ 1 saat tavlama uygulanmıştır. Numunelerin dördü, tane büyümesi olup olmadığını araştırmak için 700C⁰ de 3 saat tavlannmıştır.

Tavlama işlemlerinden sonra numunelerin mikroyapı incelemesi, % 2 Nital ile dağlandıktan sonra, optikmikrografi ile yapılmıştır. Ayrıca bu numuneler çekme testi ve sertlik ölçümüne tabi tutulmuşlardır.

4.2. BULGULAR

Numuneler uygulanan ısııl işlemler sonrasında yapılan çekme testi sonuçları tablo 6'dadır.

Çekme dayanımı tavlama sıcaklığının arttırılması ile giderek azalmış ve 700C⁰ de 3 saatlik bekleme sonucunda en düşük değerine ulaşmıştır (şekil 38). Bu arada malzemenin uzama değeri tavlama sıcaklığının arttırılması ile giderek artmış, 700C⁰ de 1 saatlik tavlama ile en yüksek değerine ulaşmış ve bu sıcaklıkta 3 saatlik bekleme sonucunda tekrar düşme meydana gelmiştir (Şekil 39).

Isıl işlem sonrası sertlik ölçümü sonuçları tablo 7'dedir. İşlem sıcaklığının artmasıyla birlikte sertlikte düşme olduğu ve 700C⁰ de 3 saatlik bekleme sonucunda en düşük değere geldiği görülmektedir.

Numune No	Çap (mm)	Deformasyon %
1	3.90	53
2	3.35	65
3	2.83	26
4	2.35	49
5	2.30	51
6	0.82	72

Tablo 4. Numunelerin çapları ve soğuk şekillendirilme dereceleri

No	%	500°C	600°C	700°C	700°C
		1 sa.	1 sa.	1 sa.	3 sa.
3	26	546	415	365	300
4	49	610	450	375	340
5	51	638	460	365	342
6	72	648	465	360	345

Numune No	Çekme day. MPa	Uzama (%)
1	644	5
2	646	-
3	546	8.7
4	610	7
5	638	9.5
6	648	5.4

Tablo 5. Numunelerin başlangıç durumundaki mekanik özellikleri

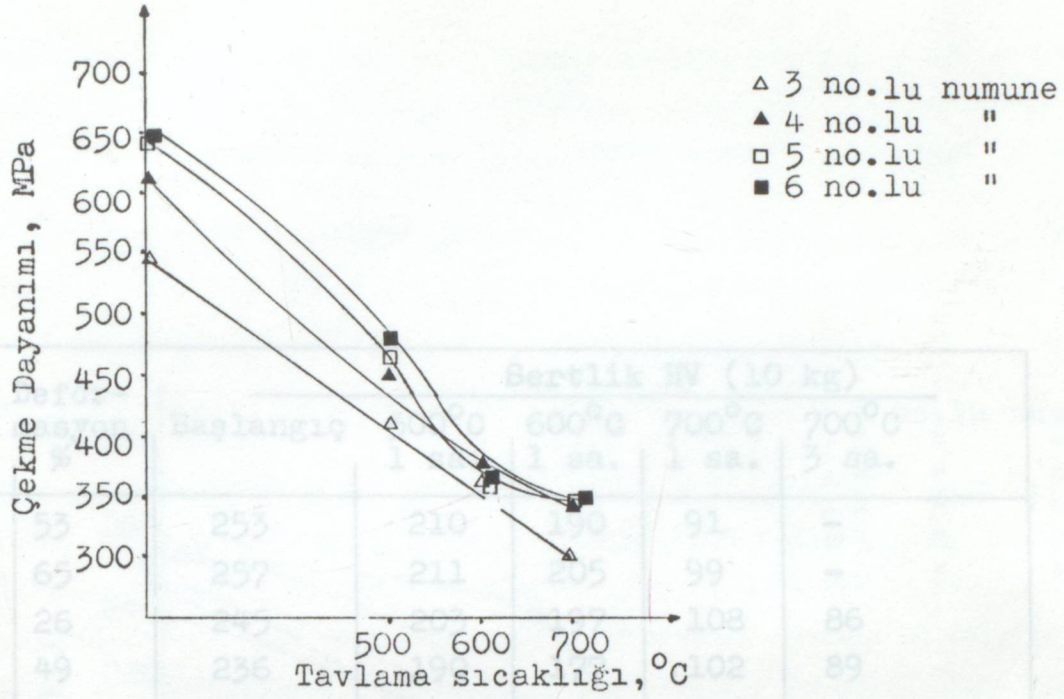


No	Deformasyon %	Başlangıç	Çekme Dayanımı (MPa)			
			500°C 1 sa.	600°C 1 sa.	700°C 1 sa.	700°C 3 sa.
3	26	546	415	365	300	295
4	49	610	450	375	340	335
5	51	638	460	365	342	330
6	72	648	465	360	345	335

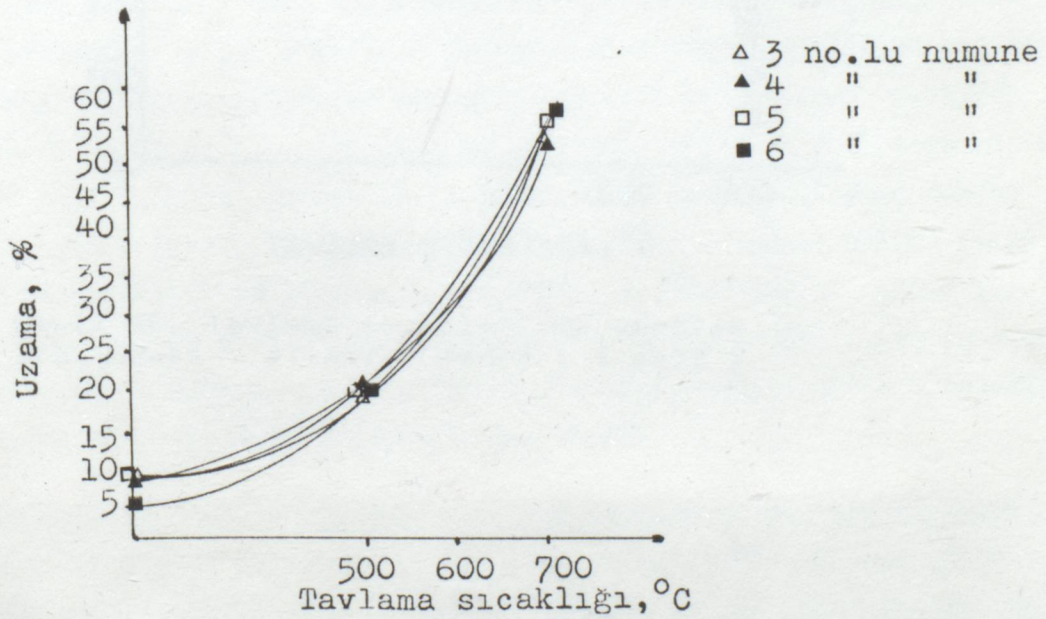
Tablo 6a. Tavlama sonrası çekme testi sonuçları

No	Deformasyon %	Başlangıç	Uzama, %			
			500°C 1 sa.	600°C 1 sa.	700°C 1 sa.	700°C 1 sa.
3	26	8.7	18.7	-	52.9	43.9
4	49	7	21.6	-	52.1	50.5
5	51	9.5	20.5	-	55.6	37.8
6	72	5.4	19.8	-	56.8	41.8

Tablo 6b. Tavlama sonrası uzama değerleri



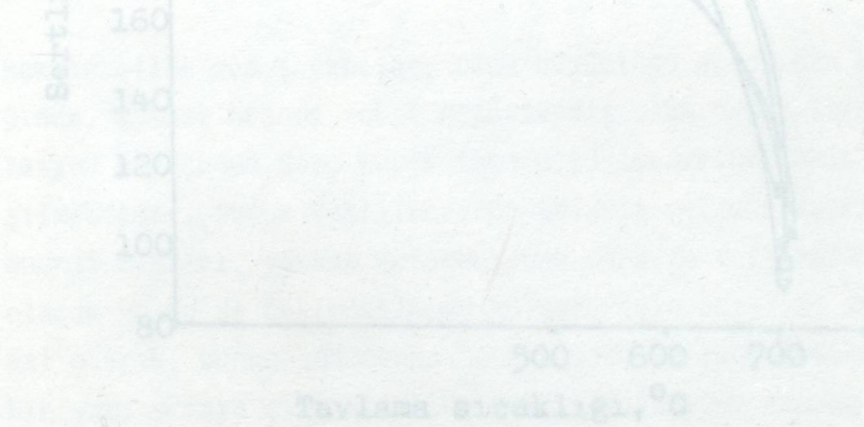
Şekil 38. Tavlama sıcaklığının çekme dayanımı üzerindeki etkisi (süre : 1 saat)



Şekil 39. Tavlama sıcaklığının uzama değeri üzerindeki etkisi (süre : 1 saat)

No	Deformasyon %	Sertlik HV (10 kg)				
		Başlangıç	500°C 1 sa.	600°C 1 sa.	700°C 1 sa.	700°C 3 sa.
1	53	253	210	190	91	-
2	65	257	211	205	99	-
3	26	245	203	197	108	86
4	49	236	190	177	102	89
5	51	245	180	175	94	82
6	72	252	239	185	115	107

Tablo 7. Başlangıç ve ısıtım işlem sonrası sertlikleri



Sekil 40. Tavlama sıcaklığı ve sertlik arasındaki ilişki (duru : 1 saat)

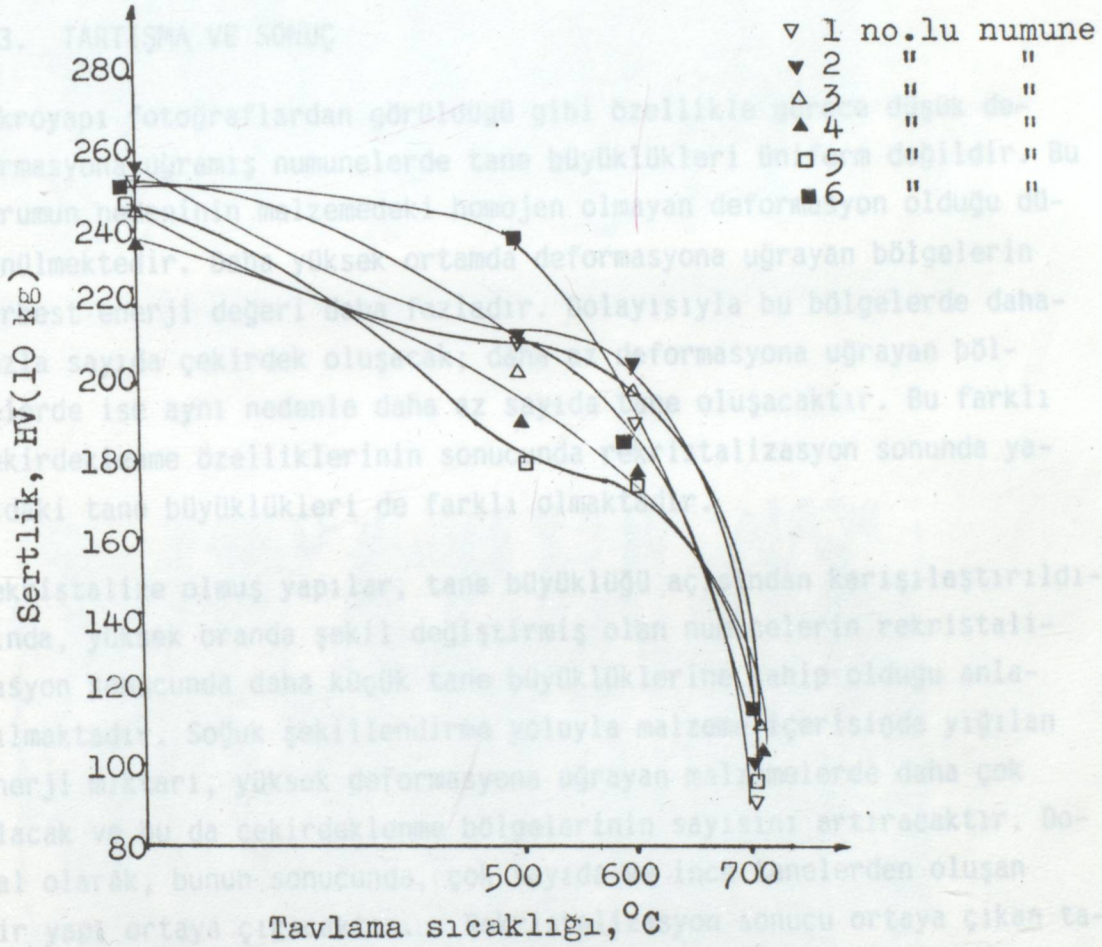
Numunelerin başlangıç durumundaki yapıları soğuk şekillendirme sonucunda uzamış tanelerden oluşmaktadır. (Şekil 4/-43)

500°C de ve 600°C de yapılan 1 saatlik tavlama ile yapıda bir değişiklik olmamıştır. Yani bu deformasyon dereceleri için bu sıcaklıklar, rekristalizasyon oluşumu için yeterli olmamıştır. (Şekil 44-53).

700°C de 1 saatlik tavlama sonucunda tüm numunelerde yeni, ince, eş-eksensli tanelerin oluşmuş olduğu rekristalizasyon yapısı ortaya çıkmıştır. (Şekil 54 -58).

4.3. TAVLAMA VE SONUÇ

Mikroyanıt fotoğraflardan görüldüğü gibi özellikle soğuk deformasyon sonucu oluşan uzamış numunelerde tane büyüklükleri büyük olmaktadır. Bu durumun malzemenin mekanik özellikleri üzerinde olumsuz etkileri vardır. Rekristalizasyon ortama malzemenin deforme olmaya başladığı andan itibaren başlar. Rekristalizasyon sıcaklığı, malzemenin mekanik özellikleri üzerinde olumsuz etkileri vardır. Rekristalizasyon sıcaklığı, malzemenin mekanik özellikleri üzerinde olumsuz etkileri vardır. Rekristalizasyon sıcaklığı, malzemenin mekanik özellikleri üzerinde olumsuz etkileri vardır.



Şekil 40. Tavlama sıcaklığı ve sertlik arasındaki ilişki (süre : 1 saat)

700°C de üç saatlik tavlama sonucunda meydana gelen tane büyüklükleri Tablo 9'da verilmiştir. Tablodan ve Şekil 59 - 61'den görüldüğü gibi bu sıcaklıkta üç saatlik beklleme süresi, tane büyümesine

Numunelerin başlangıç durumundaki yapıları soğuk şekillendirme sonucunda uzamış tanelerden oluşmaktadır. (Şekil 41 - 43)

500°C de ve 600°C de yapılan 1 saatlik tavlama ile yapıda bir değişiklik olmamıştır. Yani bu deformasyon dereceleri için bu sıcaklıklar, rekristalizasyon oluşumu için yeterli olmamıştır. (Şekil 44-53).

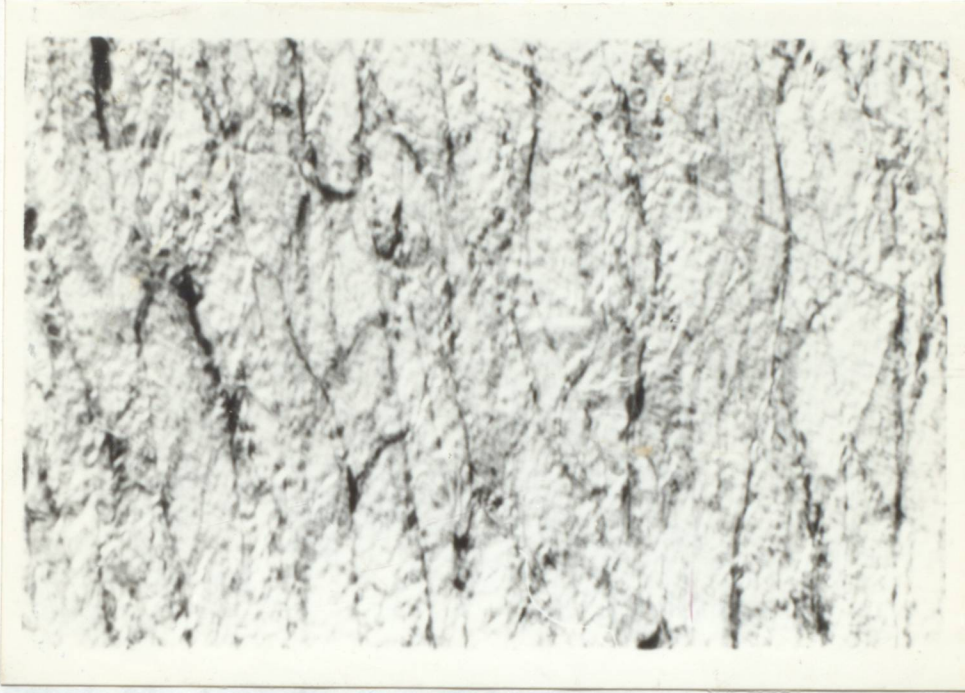
700°C de 1 saatlik tavlama sonucunda tüm numunelerde yeni, ince, eş-ksenli tanelerin oluşmuş olduğu rekristalizasyon yapısı ortaya çıkmıştır. (Şekil 54 - 58).

4.3. TARTIŞMA VE SONUÇ

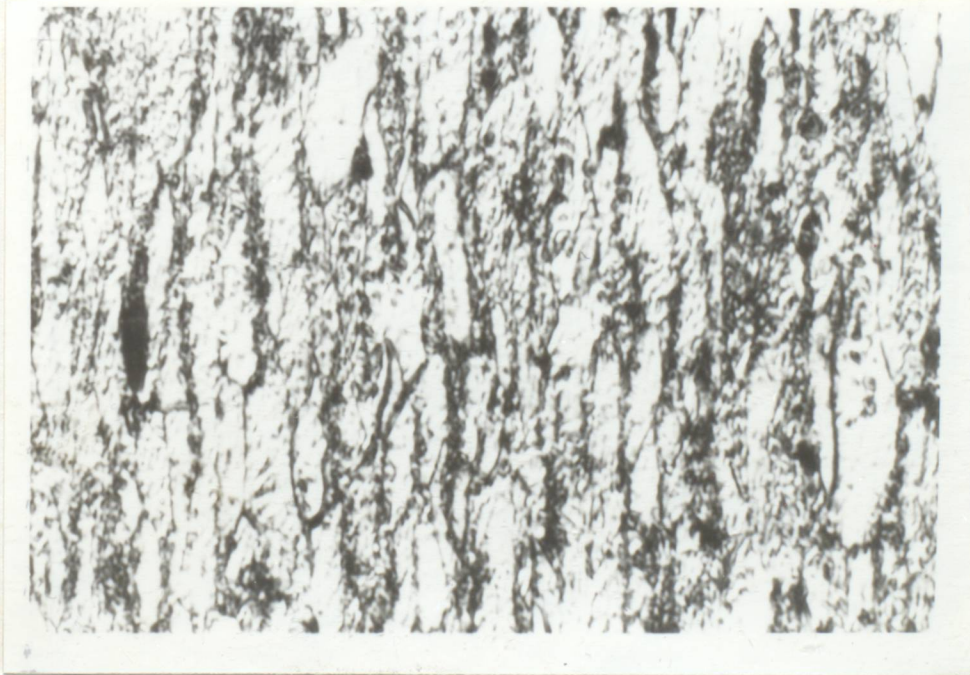
Mikroyapı fotoğraflardan görüldüğü gibi özellikle görece düşük deformasyona uğramış numunelerde tane büyüklükleri üniform değildir. Bu durumun nedeninin malzemedeki homojen olmayan deformasyon olduğu düşünülmektedir. Daha yüksek ortamda deformasyona uğrayan bölgelerin serbest enerji değeri daha fazladır. Dolayısıyla bu bölgelerde daha fazla sayıda çekirdek oluşacak; daha az deformasyona uğrayan bölgelerde ise aynı nedenle daha az sayıda tane oluşacaktır. Bu farklı çekirdeklenme özelliklerinin sonucunda rekristalizasyon sonunda yapıdaki tane büyüklükleri de farklı olmaktadır.

Rekristalize olmuş yapılar, tane büyüklüğü açısından karışlaştırıldığında, yüksek oranda şekil değiştirmiş olan numunelerin rekristalizasyon sonucunda daha küçük tane büyüklüklerine sahip olduğu anlaşılmaktadır. Soğuk şekillendirme yoluyla malzeme içerisinde yığılan enerji miktarı, yüksek deformasyona uğrayan malzemelerde daha çok olacak ve bu da çekirdeklenme bölgelerinin sayısını artıracaktır. Doğal olarak, bunun sonucunda, çok sayıda ve ince tanelerden oluşan bir yapı ortaya çıkacaktır. Rekristalizasyon sonucu ortaya çıkan tane büyüklükleri tablo 8'de verilmiştir. Görüldüğü gibi, soğuk şekil değiştirme miktarı rekristalizasyon sonucu ortaya çıkan tane büyüklüğünün büyük oranda etkilemektedir. Deformasyon miktarı büyüdükçe rekristalize tane büyüklüğü küçülmüştür.

700°C de üç saatlik tavlama sonucunda meydana gelen tane büyüklükleri tablo 9'da verilmiştir. Tablodan ve Şekil 59 - 61 'dan görüldüğü gibi bu sıcaklıkta üç saatlik bekleme süresi, tane büyümesine



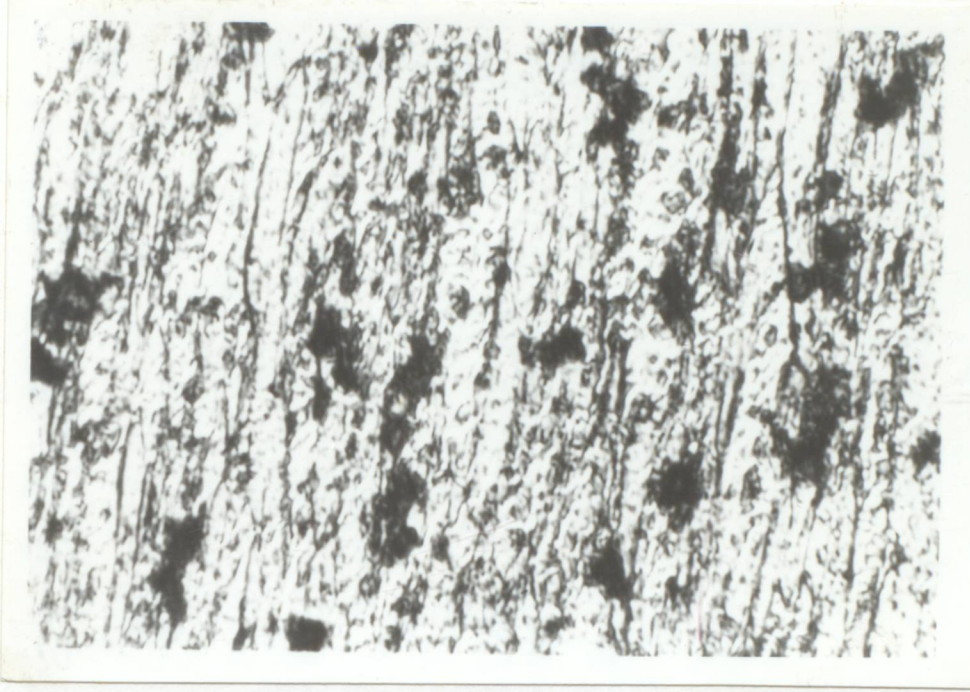
Şekil 41. 1 no'lu numune, %53 deforme edilmiş yapı



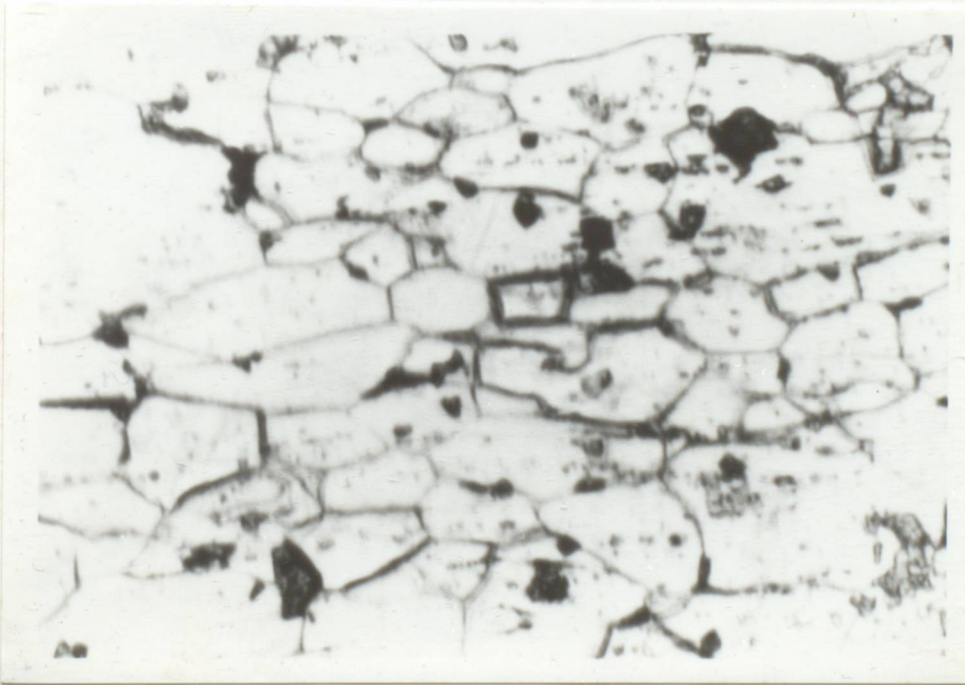
Şekil 42. 2 no'lu numune, %65 deforme edilmiş yapı

Not: Tüm fotoğraflar (700X) büyütmededir.

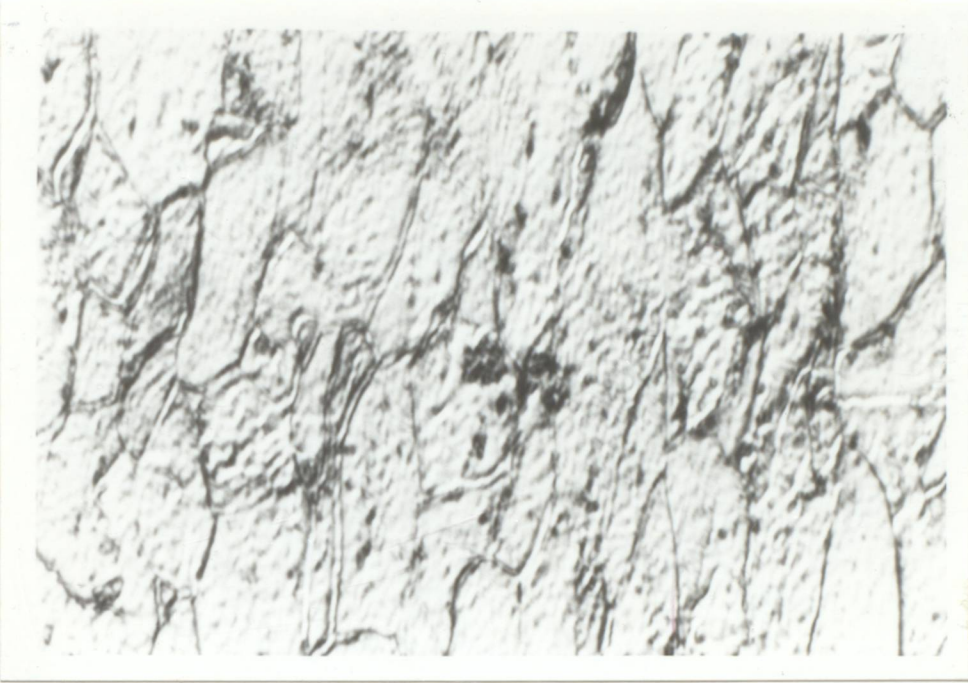
10 μ m
└─┘



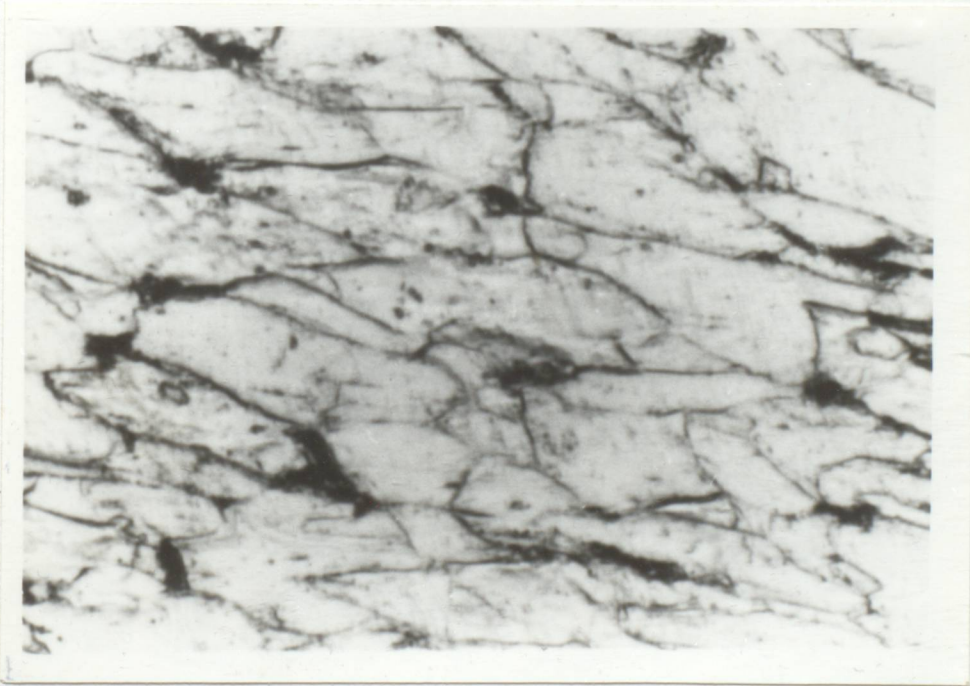
Şekil 43. 6 no'lu numune %72 deforme edilmiş yapı



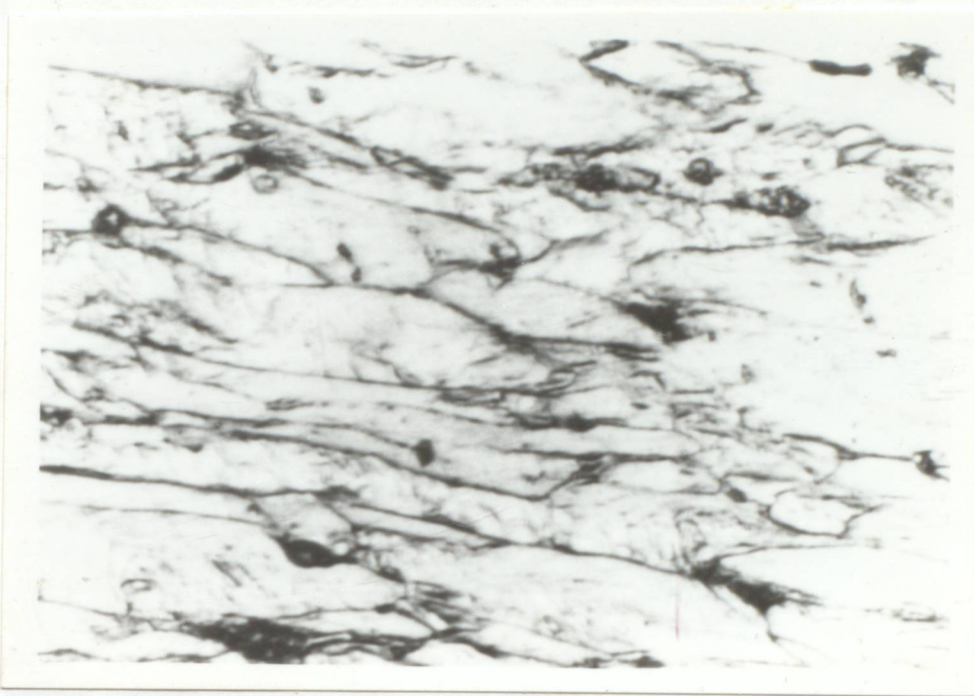
Şekil 44. 3 no'lu numune, %26 deformasyon, 500 C'de 1 saat tavlama



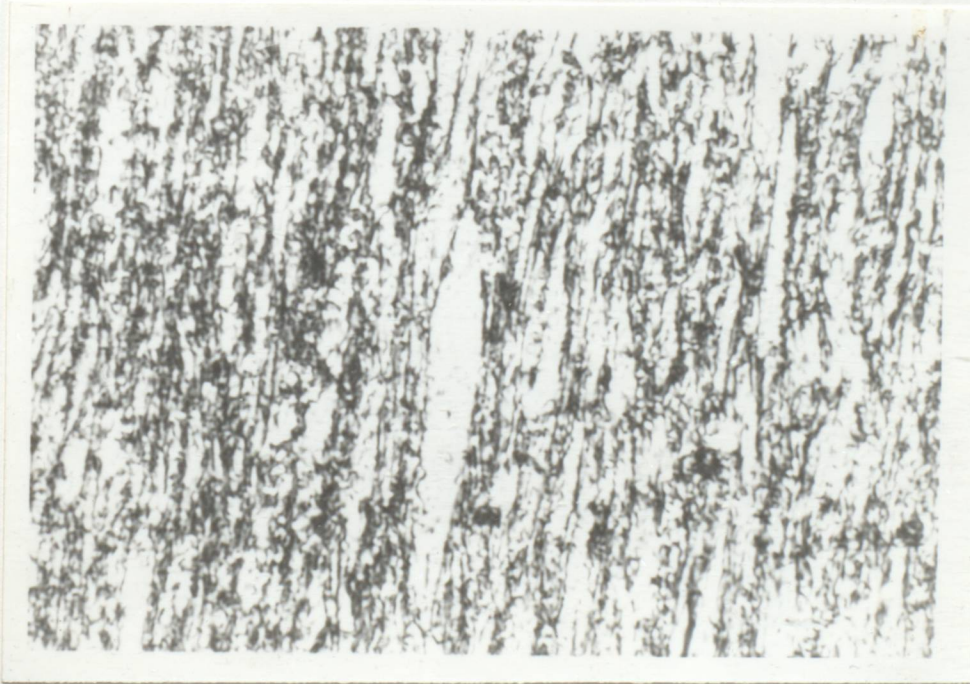
Sekil 45. 5 no'lu numune %51 deformasyon, 500 C'de
1 saat tavlama



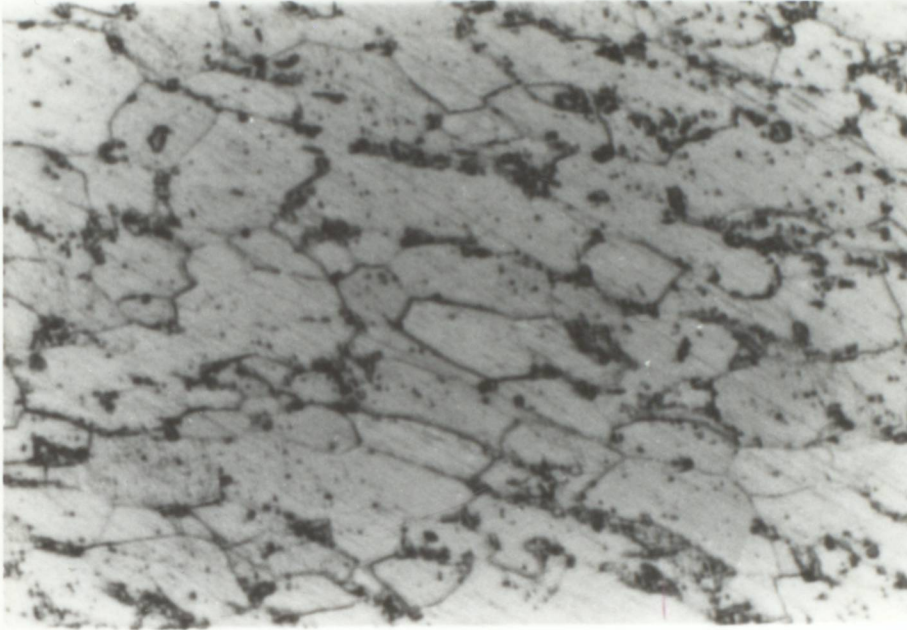
Sekil 46. 1 no'lu numune, %53 deformasyon, 500 C'de
1 saat tavlama



Sekil 47. 2 no'lu numune %65 deformasyon, 500 C'de 1 saat tavlama



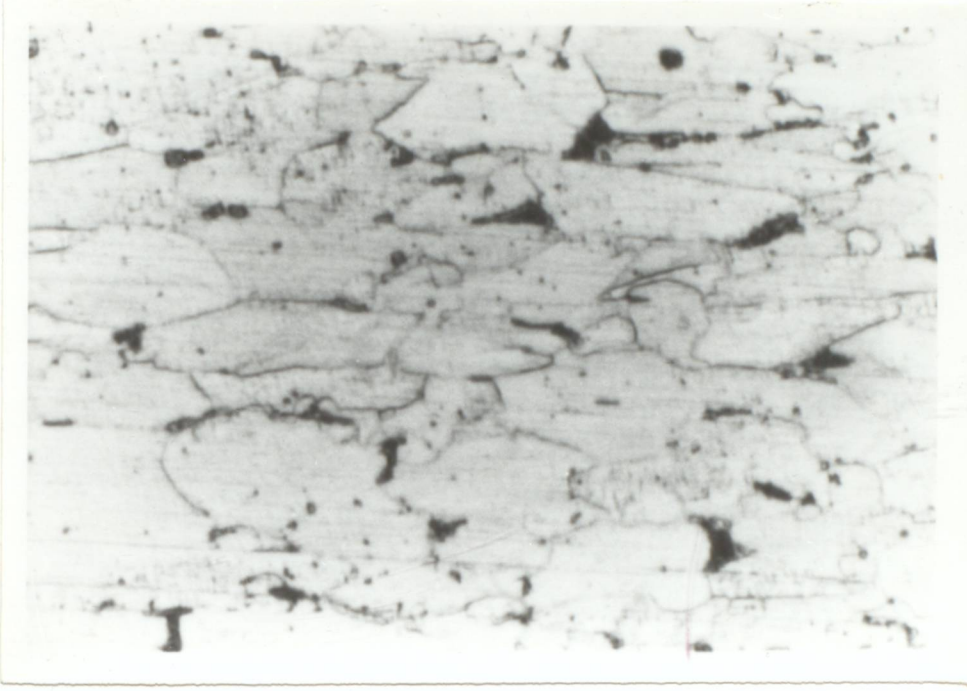
Sekil 48. 6 no'lu numune, %72 deformasyon, 500 C'de 1 saat tavlama



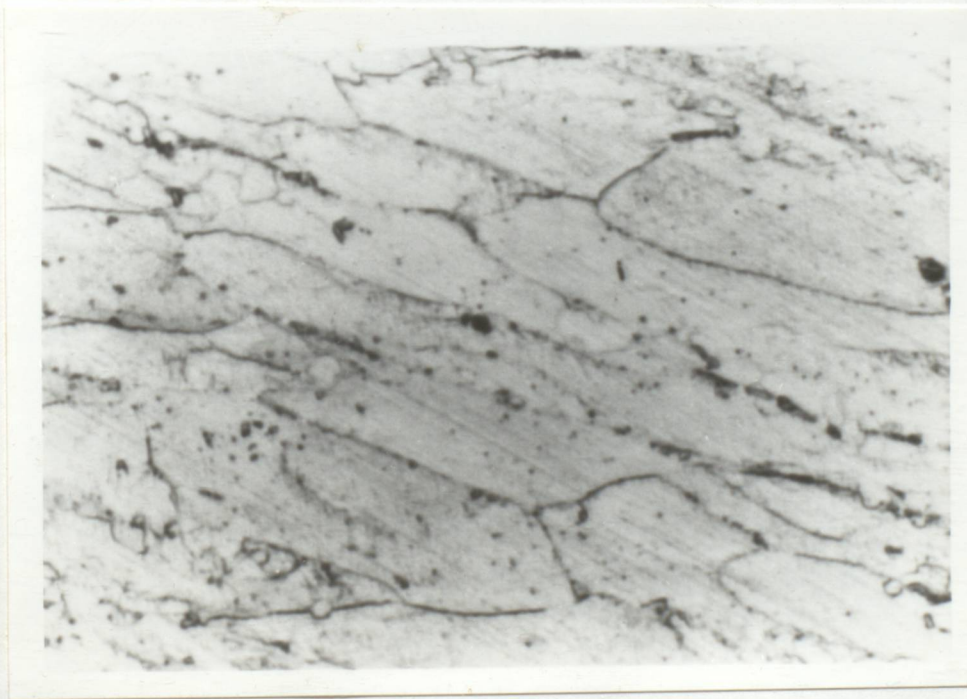
Sekil 49. 3 no'lu numune %26 deformasyon, 600 C'de
1 saat tavlama



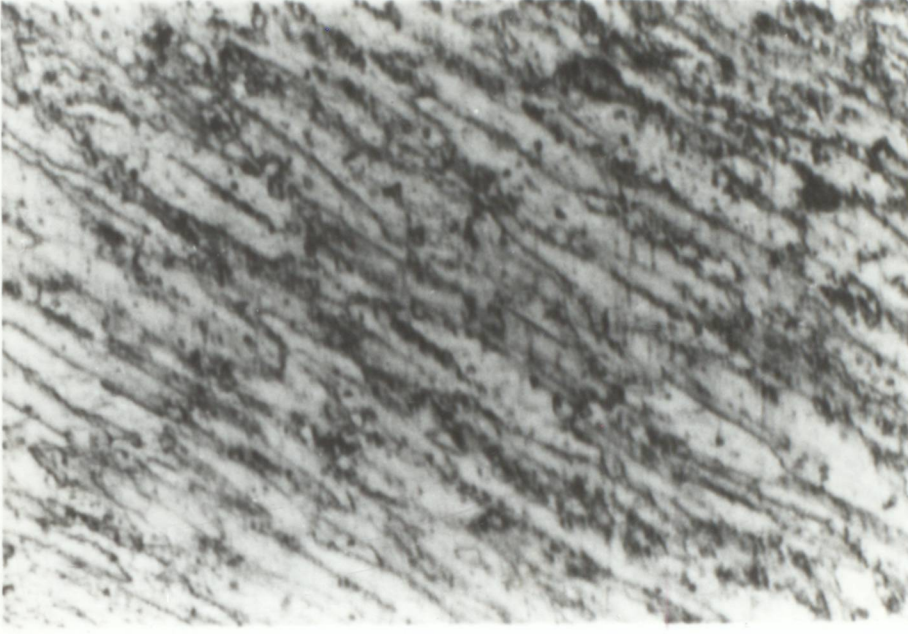
Sekil 50. 5 no'lu numune, %51 deformasyon, 600 C'de
1 saat tavlama



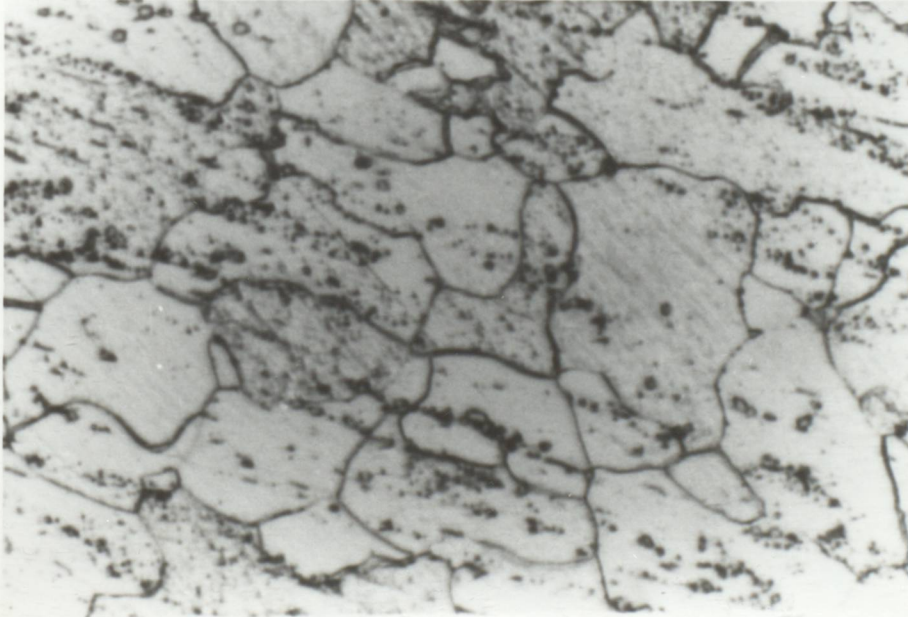
Şekil 51. 1 no'lu numune %53 deformasyon, 600 C'de
1 saat tavlama



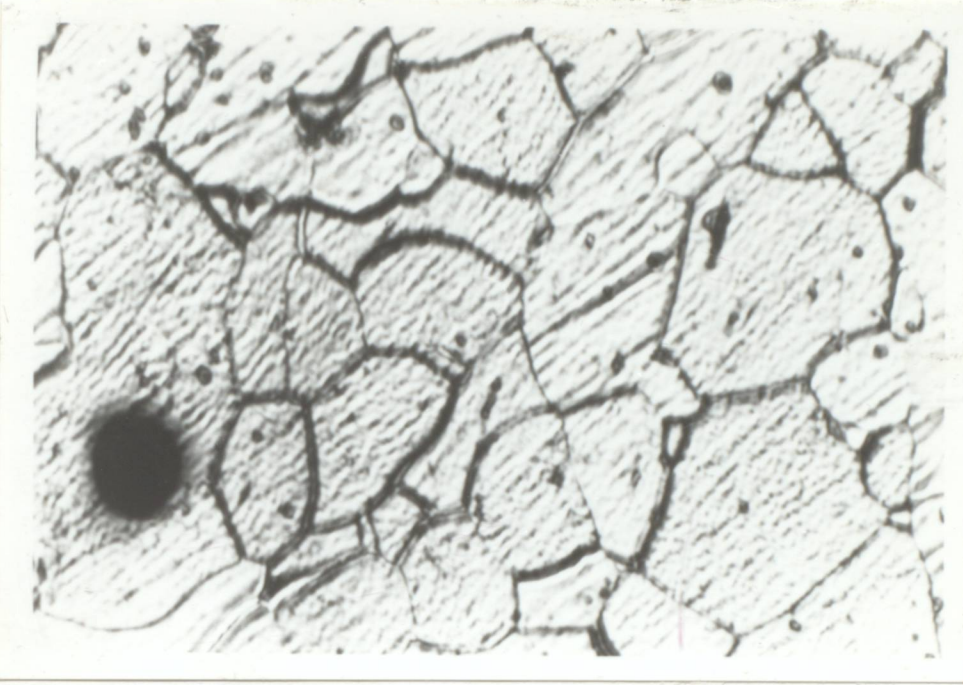
Şekil 52. 2 no'lu numune, %65 deformasyon, 600 C'de
1 saat tavlama



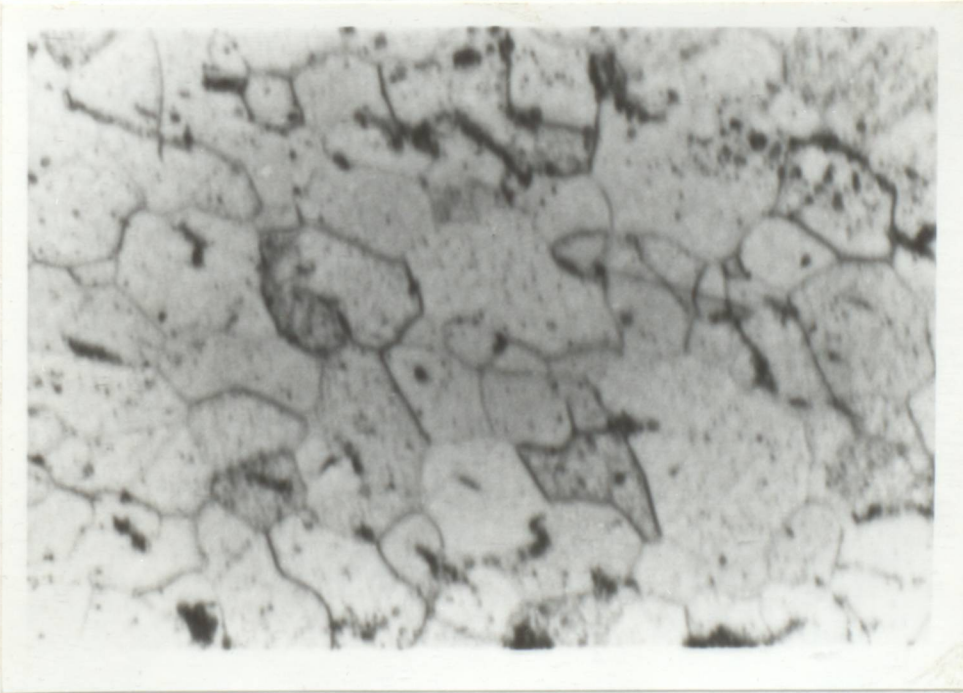
Şekil 53. 6 no'lu numune %72 deformasyon, 600 C'de 1 saat tavlama



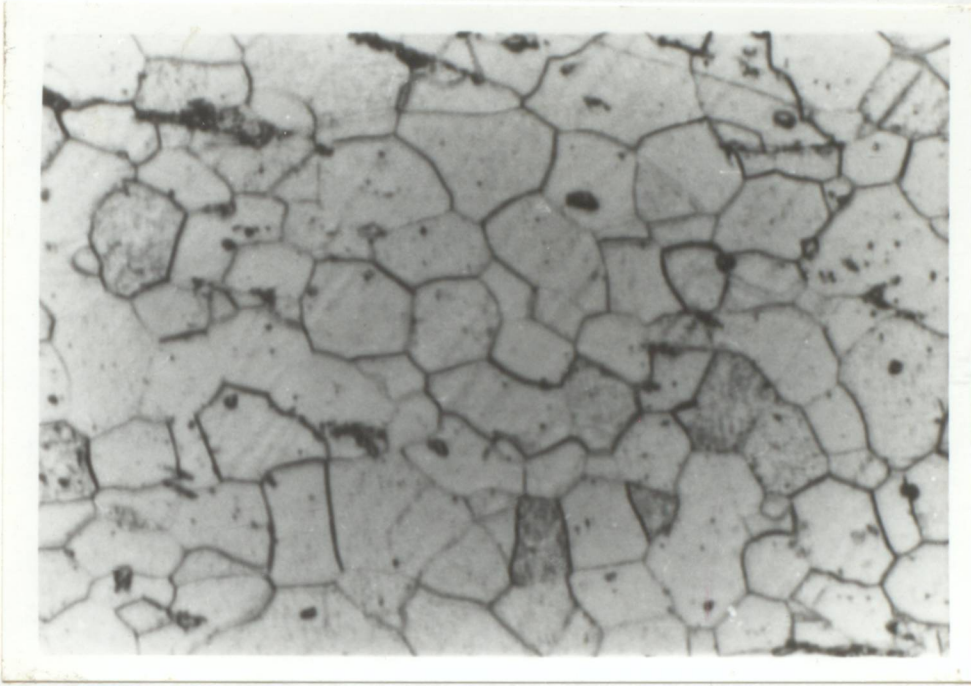
Şekil 54. 3 no'lu numune, %26 deformasyon, 700 C'de 1 saat tavlama



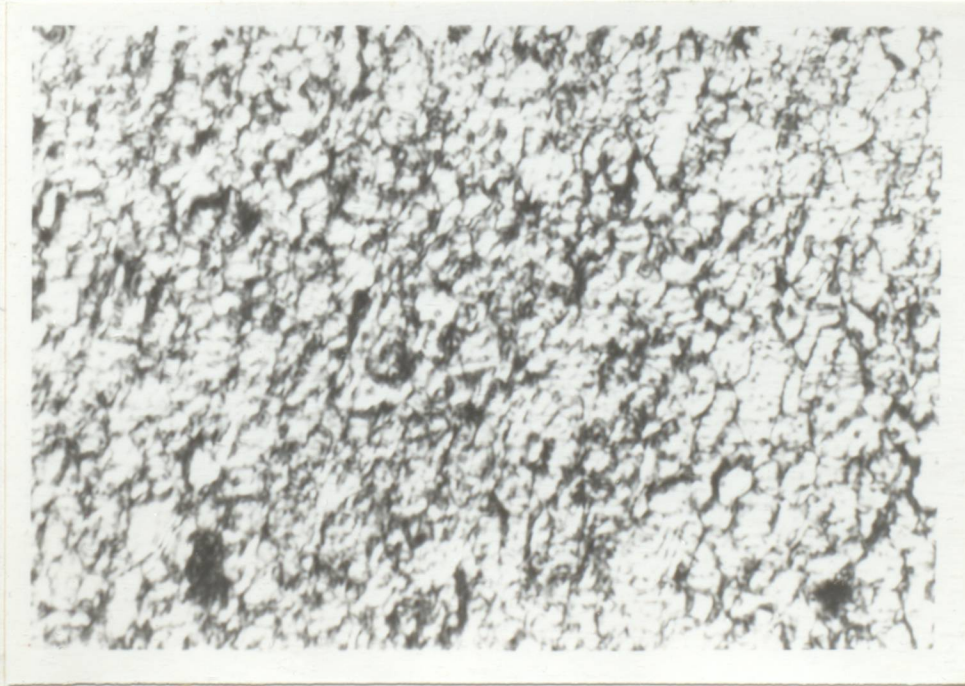
Şekil 55. 5 no'lu numune %51 deformasyon, 700 C'de
1 saat tavlama



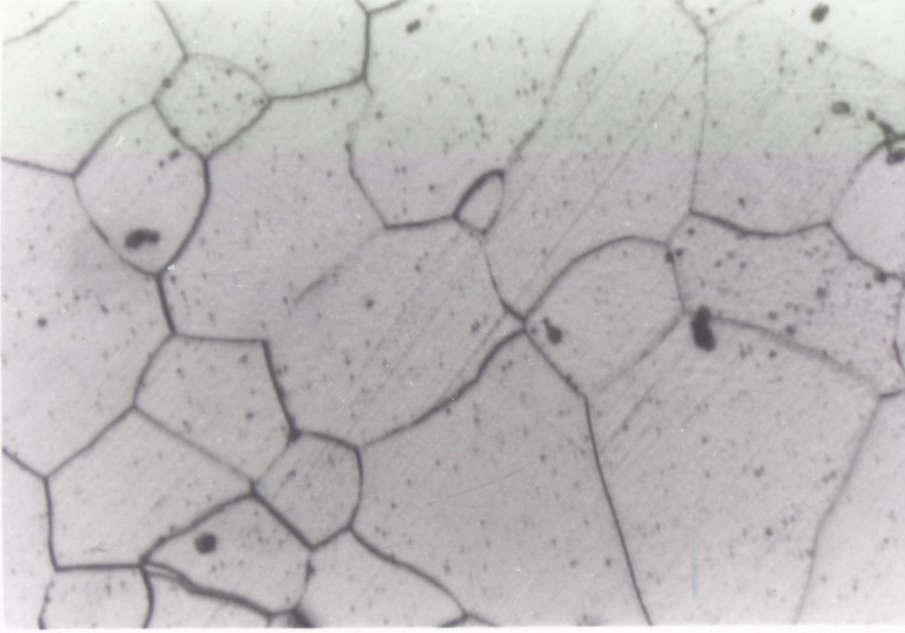
Şekil 56. 1 no'lu numune, %53 deformasyon, 700 C'de
1 saat tavlama



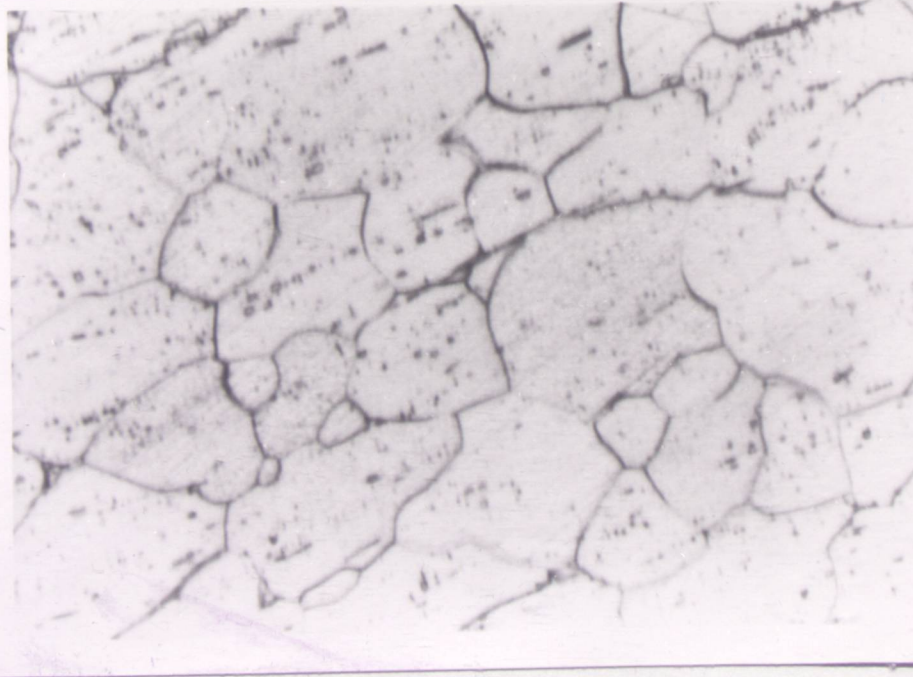
Sekil 57. 2 no'lu numune %65 deformasyon, 700 C'de 1 saat tavlama



Sekil 58. 6 no'lu numune, %72 deformasyon, 700 C'de 1 saat tavlama

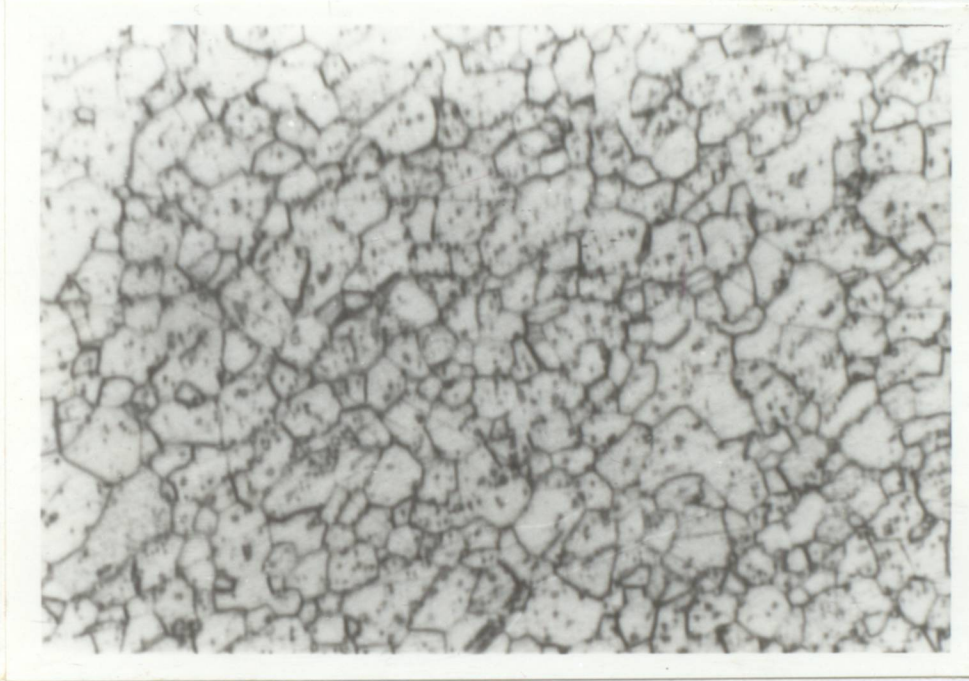


Şekil 59. 3 no'lu numune %26 deformasyon, 700 C'de
3 saat tavlama



Şekil 60. 5 no'lu numune, %51 deformasyon, 700 C'de
3 saat tavlama

nerden oluştuğu ve bu nedenle yapıda farklı boyutlu tanelerin
mevcut olduğu görülmüştür. Mikristalizasyon işlemi için
yeterli bir süre için 700°C gibi sıcaklıkta tutulmuş
halka ve diğer yapılar, sıcaklık düşürüldükten sonra
sıcaklık ortama düşene kadar tutulmuştur. İç yapıda bu tür bir
nucule oluşmuştur.



Sekil 61. 6 no'lu numune %72 deformasyon, 700 C'de
3 saat tavlama

neden olmuştur. Aynı zamanda mikroyapıda farklı büyüklükte tanelerin mevcut olduğu görülmektedir. Rekristalizasyonun meydana gelmesi için yeterli bir sıcaklık olan 700°C gibi bir sıcaklıkta böyle uzun bir bekleme süresinin uygulanması sekonder rekristalizasyonun ortaya çıkmasına neden olmuştur. İç yapıdaki bu olumsuz durum da bu olayın sonucunda oluşmuştur.

Isıl işlemlerden sonra yapılan testler sonucunda tavlama sıcaklığının artması ile malzemenin dayanım değerlerinin düştüğü görülmüştür. Haddelme nedeniyle gerinim setleşmesine uğrayan malzemenin mekanik özelliklerinde tavlama sonucunda yumuşama meydana gelmiştir. 500°C 'deki tavlama ile çekme dayanımında % 24-28 azalma, uzama değerlerinde % 10-14.6 artma, sertlik değerlerinde % 5-26 azalma olmuştur. 600°C 'de yapılan tavlama sonucunda çekme dayanımında % 33-44 azalma, sertlikte % 20-29 azalma olmuştur. 700°C 'deki tavlama sonrasında çekme dayanımındaki azalma % 44-47 arasında olmuş, uzama değerinde % 44.2-51.4 arasında artış meydana gelmiş, sertlik ise % 54-64 arasında azalmıştır.

Yapılan ısı işlemler ile, malzemedeki hata konsantrasyonunun azalması sonucunda, çekme dayanımı ve sertlik değerlerinde düşme olmuş ve uzama değerleri artmıştır. Özelliklerdeki bu değişimler tavlama sıcaklığındaki yükselme ile paralellik göstermektedir. Beklenildiği gibi, en düşük çekme dayanımı, en düşük sertlik ve en büyük uzama değerleri 700°C 'de 1 saatlik tavlama ile elde edilmiştir. 700°C 'de üç saat bekleme ile yapılan ısı işleminden sonra çekme dayanımında % 1.2, sertlikte % 4.9 ilave azalma olmuş, uzama değerlerinde ise % 1.6-17,8 arasında düşme meydana gelmiştir. Burada sertlikteki ve çekme dayanımındaki düşmeler oldukça azdır, ancak uzamadaki durum dikkat çekicidir. Tavlama sıcaklığının artmasıyla uzama miktarı da artmakta, ancak 700°C 'de üç saat bekleme sonucunda uzama düşmektedir. Bunun nedeni uzun bekleme süresi nedeniyle ikincil rekristalizasyon oluşması, ortaya çıkan kaba ve çok farklı büyüklükteki tanelerin malzemenin sünekliğini düşürmesidir.

St 37 malzemedan yapılan teller üzerinde yürütülen bu deneysel çalışmanın verilerinin ışığında, bu malzeme için uygun rekristalizasyon

sıcaklığının 700°C olduğunu söyleyebiliriz. Bu sıcaklıkta 1 saat bekletilerek yapılacak bir ısıtma işlemi ile, daha önce yapılan deformasyonun uğramış olan yapıdaki gerilimlerin ortadan kaldırılması sağlanmaktadır. Bu işlemin yeni yapı ince ve eşitlenmiş bir yapıya dönüşür ve ilave işleme için uygun bir yapıdır. 500°C ve 600°C gibi düşük sıcaklıklarda 1 saat bekletilerek yapılan tavlama sonucunda gerilimlerin ortadan kaldırılması kısmen sağlanmaktadır, ancak

No	Deformasyon %	ASTM Tane büyüklüğü	
		No	
1	53	7	
2	65	8	
3	26	6	
5	51	6-7	
6	72	10	

Tablo 8. 700°C 'de 1 saat tavlama sonucu rekristalize tane büyüklüğü

No	Deformasyon %	ASTM Tane büyüklüğü	
		No	
3	26	5	
5	51	6	
6	72	9	

Tablo 9. 700°C 'de 3 saat tavlama sonucu tane büyüklüğü

5. SONUÇ

sıcaklığının 700°C olduğunu söyleyebiliriz. Bu sıcaklıkta 1 saat beklenilerek yapılacak bir ısıtıl işlem ile, daha önce soğuk deformasyona uğramış olan yapıdaki gerinim sertleşmesinin etkileri ortadan kaldırılmaktadır. Oluşan yeni yapı ince ve eşeksenli tanelere sahiptir ve ilave şekillendirme için uygun bir yapıdır. 500°C ve 600°C gibi düşük sıcaklıklarda 1 saat beklenerek yapılan tavlama sonucunda gerinim sertleşmesinin etkileri kısmen ortadan kaldırılmakta, ancak rekristalizasyon yapısı ortaya çıkmamaktadır. 700°C 'de üç saat gibi uzun bir bekleme süresi uygulandığında ise, kaba ve farklı büyüklükteki tanelerden oluşan bir yapı meydana gelmektedir. Sekonder rekristalizasyon oluşumu nedeniyle ortaya çıkan böyle bir yapı malzemenin sünekliliğini, dolayısıyla çekilebilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Yine de, 700°C 'den daha yüksek sıcaklıklarda 1 saat-ten kısa bekleme süreli tavlama, ve da, 700°C 'den düşük sıcaklıklarda 1 saatten uzun süreli tavlama uygulanarak malzemenin rekristalizasyon özelliklerinin daha ayrıntılı olarak belirlenebilmesi olasıdır.

Tavlama zamanının artırılması işlem sıcaklığını düşürmekte, sıcaklığın yükseltilmesi ise tavlama zamanını kısaltmaktadır. Sıcaklık ya da zaman eğiiri fazla olduğunda tane büyümesi ya da sekonder rekristalizasyon ortaya çıkmakta, az olduğu zaman ise rekristalizasyon yapı oluşmamaktadır. Isıtma hızı, deformasyondan sonraki tane büyüklüğü ve katılaşma miktarı da işlemi etkileyen diğer etkenlerdir.

Ferritik çeliklerde olduğu gibi rekristalizasyonun şekillendirme aşamasına geçtiği üretim işlemlerinde gerilim, gerilim hızı ve sıcaklık değişimleri malzeme özelliklerini etkilemektedirler. Ferritik paslanmaz çeliklerde mekanik özelliklerdeki yavaşlamanın büyük bölümü dinamik tepelerle ille olmaktadır. Gerilim miktarının yükselmesi, sıcaklığın artması ve gerilim hızının azalması dinamik rekristalizasyon oluşumunu hızlandırır. Ferritik paslanmaz çeliklerde B.4'ten büyük bir gerilimde 'mikroyapı' ve 'kararlı deformasyon bölgesindeki' ortalam ferritik tane büyüklüğü hemen hemen sabit olmaktadır.

Rekristalizasyonu etkileyen faktörlerin birbirleriyle ilişkileri oldukça bellidir. Bu nedenle bu faktörlerin uygun düzenlenmesi

5. SONUÇ

Rekristalizasyon işlemi, soğuk ya da sıcak deformasyon yönteminin kullanıldığı üretim sistemlerinde önemli bir işler aşamasıdır. Çakirdek oluşumu ve sonraki gelişmesi ile eşeksenli tanelerin oluşmasıyla ortaya çıkan yeni yapı deformasyon nedeniyle önceki yapıda bulunan gerinimleri elimine eder ve yapıyı sonraki şekillendirme işlemine uygun koşullar sağlar.

Başarılı bir rekristalizasyon uygulaması, bir çok etkene bağlıdır. Malzemeye uygulanan deformasyon miktarı rekristalize yapının oluşması için başlıca etkidir. İşlem sonucunda ince ve aynı büyüklükte taneler oluşması isteniyorsa kritik şekillendirme derecesinin üzerinde bir deformasyon yapmak gereklidir. Aynı zamanda, deformasyon miktarı ne kadar büyük olursa sonuçsal tane büyüklüğü de o kadar küçük olur. Deformasyon miktarı bu değer altındaysa ya rekristalizasyon meydana gelmez ya da kaba tane oluşur. Tavlama zamanı ve sıcaklığı, birbirleriyle uyumlu olarak düzenlenmesi gereken iki faktördür. Tavlama zamanının artırılması işlem sıcaklığını düşürmekte, sıcaklığın yükseltilmesi ise tavlama zamanını kısaltmaktadır. Sıcaklık ya da zaman aşırı fazla olduğunda tane büyümesi yada sekonder rekristalizasyon ortaya çıkmakta, az olduğu zaman ise rekristalize yapı oluşmaktadır. Isıtma hızı, deformasyondan önceki tane büyüklüğü ve katışkı miktarı da işlemi etkileyen diğer etkenlerdir.

Paslanmaz çeliklerde olduğu gibi rekristalizasyonun şekillendirme aşamasında olduğu üretim işlemlerinde gerinim, gerinim hızı ve sıcaklık değişkenleri malzeme özelliklerini etkilemektedirler. Ferritik paslanmaz çeliklerde mekanik özelliklerdeki yumuşamanın büyük bölümü dinamik toparlanma ile olmaktadır. Gerinim miktarının yükselmesi, sıcaklığın artması ve gerinim hızının azalması dinamik rekristalizasyon oluşumunu kolaylaştırır. Ferritik paslanmaz çeliklerde 0.4'ten büyük her gerinimde 'mikroyapı' ve 'kararlı deformasyon bölgesindeki ortalama ferrit tane büyüklüğü' hemen hemen sabit olmaktadır.

Rekristalizasyonu etkileyen faktörlerin birbirleriyle ilişkileri oldukça belirleyicidir. Bu nedenle bu faktörlerin uygun düzenlenmesi

beklentilerin gerçekleşmesi için gereklidir. Aksi takdirde üründen beklenen teknolojik özellikler olumsuz yönde etkilenecektir. Bu nedenle işlemden önce malzeme özellikleri iyi bir şekilde analiz edilmesi ve işlem parametreleri uygun seçilerek rekristalizasyon uygulaması yapılmalıdır.

2. Robert : ...
3. ...
4. Sillars, J. : Recrystallization, *Proceedings: Recrystallization of Metallic Materials*, S. 229-235. Edited by F. Monnier, Dr. Riederer-Verlag GMBH, 1978
5. ASM : The making, shaping and Treating of Steel
S. 846, 847, 851-855
6. Naki, T. ; Okaguchi, S. ; Tamura, I. : Dynamic Recrystallization of Ferritic Stainless Steel; *Strength of Metals And Alloys*, S. 529-534 *Proceedings of the 8th. International Conference Australia, 15-20 Augst 1982 Vol. 1*
7. Naka, S. ; Shimamura, T. ; Ogasawara, K. ; Matsuda, K. : Deep Drawability and Recrystallization Texture of Annealed Al-Killed High Strength Cold-Rolled Steel; *Transactions ISIJ*, Vol. 22, 1982, S. 732-738
8. Naki, T. ; Akazaki, K. ; Ogasawara, K. ; Tamura, I. : Dynamic Recrystallization of Austenite in 10-Mn Stainless Steel and 10-Mn Maraging Steel; *Transactions ISIJ*, Vol. 22, 1982, S. 253-264

KAYNAKÇA

1. Avner, S.H. : Introduction to Physical Metallurgy
S. 131 - 135, Mc Graw Hill, 1984
2. Robert E. Reed-Hill : Physical Metallurgy Principles
S. 284-298, Affiliated East-West Press PVT. LTD., 1974
3. Lakhtin, Yu. : Engineering Physical Metallurgy and Heat Treatment
S. 82-86, Mir Publishers. 1983
4. Dillamore, I.L. : Recrystallization Processing; Recrystallization of
Metallic Materials, S. 228-235, Edited by F. Heassner,
Dr. Riederer-Verlag GMBH, 1978
5. ASM : The making, shaping and Treating of Steel
S. 846, 847, 851-855
6. Maki, T. ; Okaguchi, S. ; Tamura, I. : Dynamic Recrystallization of
Ferritic Stainlees Steel; Strength of Metals And Alloys,
S. 529-534 Proceedings of the Gth. International Conference
Australia, 16-20 Augst 1982 Vol. 1
7. Ono, S.; Shimomura, T.; Osawa, K.; Matsuda, K.: Deep Drawability
and Recrystallisation Texture of Rephosphorized Al-Killed
Hight Strength Cold-Rolled Steel; Transactions ISIJ, Vol. 22,
1982, S. 732-738
8. Maki, T.; Akasaka, K.; Okuna, K.; Tamura, I. : Dynamic
Recrystallization of Austenite in 18-8 Stainless Steel and
18 Ni Maraging Steel; Transactions ISIJ, Vol. 22, 1982,
S. 253-261

9. F. Haessner : Systematic Survey And Basic Problems of
Recrystallization; Recrystallization of Metallic Materials,

S. 1-4, Dr. Riederer-Verlag Gmbhl, 1978

10. Topbaş, M. Ali : Isıl İşlemler 2, Lisansüstü Ders Notları,

S. 209, 210

ÖZGEÇMİŞ

1967 yılında KARABÜK'te doğdum. İlk ve orta öğrenimimi İstanbul'da tamamladım. 1987 yılında Yıldız Üniversitesinden Metalurji Mühendisi olarak mezun oldum. Aynı yıl Etibank Elazığ Ferrokrom işletmesi'nde Üretim Mühendisi olarak göreve başladım. 1989 yılından bu yana özel bir şirkette kalite kontrol uzmanı olarak çalışmaktayım.

