

57468



**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HADDELEME İŞLEMİNİN  
İÇ YAPI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ VE  
HADDELENEBİLİRLİK ÖZELLİĞİNİN  
İNCELENMESİ**

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
YÜKSEK ÖĞRETİM VE  
ARAŞTIRMA MERKEZİ

**Makina Mühendisi Halil İbrahim DİKKANAT**

F.B.E. Makina Mühendisliği Anabilim Dalı İmal Usulleri Programında

hazırlanan

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Tez Danışmanı : Prof. Mehmet Emin YURCI

**İSTANBUL, 1996**

## İÇİNDEKİLER

	TEŞEKKÜR	
	ÖZET	
1	GİRİŞ	1
2	HADDELEME İLE PLASTİK ŞEKİLLENDİRME	3
2.1	Haddelenebilme Kabiliyeti	3
2.2	Hadde Türlerine Göre Plastik Deformasyon	5
2.3	Plastik Şekillendirmede Metalsel Malzemelerde Meydana Gelen Temel Safhalar	7
2.4	Çok Kristalli ve Tek Kristalli Yapıda Plastik Şekillendirmede Meydana Gelen Safhalar	8
2.5	Metalsel Malzemelerde Pekleşme ve Şekil Değişirme	14
2.6	Yeniden Kristalleşme	16
2.7	Sıcak Şekillendirme	21
3	PLASTİK ŞEKİLLENDİRME ESASLARI	26
3.1	Plastik Şekillendirmede Hacim Sabitliği Kanunu	26
3.2	Şekil Değişirme Mukavemeti	26
3.3	Metalsel Malzemelerde Şekil Değişirme Direnci	30
4	HADDELEME SAFHASINDA TEMEL ESASLAR	33
4.1	Haddelemede Malzeme Akışı	33
4.2	İlk Deformasyon Karakteri İle Ergitme ve Döküm Koşullarının Haddelenebilme Kabiliyetine Etkileri	35
4.3	Makro Yapı ve Mikro Yapının Haddelenebilme Kabiliyetine Etkileri	35
4.4	Sıcak Haddelemede Genişleme, Uzama ve İncelme Arasındaki İlişkiler	36
4.5	Haddeleme Hızı	40
4.6	Hadde Basıncı	40
4.7	Haddelerde Yüklenme Sınırı	44
4.8	Sıcak Haddeleme İşleminde Genişleme ve Uzama	45
4.9	Yumuşak Çelikte Haddeleme Esnasında Malzeme Akışı ve Malzeme Yapısı	45

5	HADDELENEBİLİR MALZEMELERİN İNCELENMESİ	51
5.1	Çeliklerin Haddelenmesi Sırasında Oluşan İç Yapının İncelenmesi	
5.2	Haddelemede Çelik ve Alaşımlarının Yapılarında Oluşan Etkiler	54
5.3	Farklı Elementlerin Çeliğin Plastik Özelliğine Etkileri	55
5.4	Düşük Karbonlu Çeliklerin Mikro Yapısının İncelenmesi	57
5.5	Çinko ve Çinko Alaşımlarının Mikro Yapısının İncelenmesi	58
5.6	Sonuçlar	71
	KAYNAKLAR	73
	ÖZGEÇMİŞ	



## TEŞEKKÜR

Tez çalışmamı yöneten, çalışmam boyunca sürekli desteğini gördüğüm ve değerli fikirlerinden yararlandığım Hocam Sayın Prof. Mehmet Emin YURCİ'ye ,  
Ayrıca tezimin yazılmasında yardımlarını esirgemiyen ve büyük titizlik gösteren Sayın Ali BOSTANCI'ya,  
En derin saygılarımı sunarım.

## ÖZET

Bu çalışmada, haddeleme işlemi uygulanırken haddelenen malzemenin iç yapısındaki şekil değişimi sonucu oluşan metalurjik değişimler ve haddelenebilir malzemelerin iç yapısındaki kimyasal bileşimin haddeleme işlemi sonucu gösterdiği özellikler incelenmiştir.

Haddeleme ile plastik şekillendirme durumunda, malzemenin haddeden çekilebilme kabiliyeti ile plastik şekillendirme sırasında malzeme iç yapısındaki kristallerde meydana gelen safhalar ve haddelenen malzemelerin sıcak ve soğuk şekil değiştirme durumuna bağlı olarak malzemenin aldığı yapı ile malzeme özellikleri incelenmiştir. Haddeleme safhasındaki temel esaslar ve malzeme yapısı, şekil ve tablolar yardımı ile ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Son olarak haddelenebilir malzemelerin mikro yapıları ve malzeme bileşenlerinin haddeleme işlemi üzerindeki etkileri örnekler üzerinde incelenmiştir.

## **SUMMARY**

In this study, the metallurgical changes resulting from the deformation of the internal structure of the rolled material during the rolling process and the chemical properties in the internal structure of the ductile materials after the rolling process have been researched.

In the case of plastic deformation with rolling, the ductility and the phases of the internal structure of the crystals during plastic deformation, and the properties and structure depending on the hot or cold deformation of the rolled material have been researched.

The structure of the material and the principal states during the rolling process have been detailed explained with help of tables and drawings.

At last, the micro structures of the ductile materials and the effects of the components on the rolling process have been researched with examples.

## 1 GİRİŞ

Metal ve alaşımlarının haddelenebilirliği; işlem sıcaklığı, deformasyon oranı, gerilme hali ve işlem sonrası metal kalitesi gibi proses koşulları altında bir cismin şeklinde sürekli değişiklik yapmak için gerekli belirli bir enerji miktarının cismin hacminde birikmesi sonucu, malzemenin kırılmadan deforme edilebilme özelliği şeklinde açıklanır. Haddelenebilirlik özelliğini belirleyen işlem faktörlerinden sabit olanlar şunlardır: Sahip olunan rijitliği ve deformasyona karşı direnci belirleyen kimyasal bileşim, ergitme ve döküm metotları, ingot yapısı ve deforme edilen metalin makroskobik ve mikroskobik yapıları.

Katı çözeltilerin haddelenebilme kabiliyetleri ana elementin plastik özelliklerine göre belirlenir. Örneğin; Ferro-Nikel alaşımlarının haddelenebilme kabiliyetleri, demir ve nikelin her ikisinde iyi plastik özelliklere sahip olmalarından dolayı oldukça iyidir. Elementler katı çözelti içerisinde tam olarak çözülmedikleri takdirde plastisite azalır. Fakat tane içindeki ve tane sınırındaki kalıntılar olarak metal içerisinde kalıntı fazlarını oluştururlar. Saf maddelerin ve mikroskobik boyutta farklı element ilaveleri kullanılmasının, haddelenebilme işlemine etkileri olduğu gözönüne alınmalıdır. Çelik veya alaşımın bir kısmındaki ayrı elementlerin bileşenlerinin uygunluğu ve metal içindeki üniform olmayan element dağılımı da büyük önem gösterir.

Her metal malzeme çok kristalli olup, her kristal tanesinde yönleri kristalografik olarak belirlenen kayma eğrileri meydana gelmektedir. Bu kristal taneleri tane sınırlarında birbirleriyle doğrudan temas halindedir. Kristallerden oluşan malzemelerde; kristallerde tane sınırlarında kuvvetler dengesinin bozulması, kristaller içerisinde kuvvetler dengesi bozulması ve bağımsız kristallerin parçalanması safhaları oluşur. Kristalcikler içerisinde meydana gelen şekil değiştirme safhası prensip olarak, tek kristallere plastik şekil verilmesi halinde söz konusudur.

Kristal tanelerindeki mukavemete oranla kristal sınır kütlesi daha düşük bir mukavemete sahip olan metal malzemelerde; şekil değiştirme safhası genellikle bağımsız kristallerin bir birine karşı kaydırılması suretiyle yerine getirilmektedir. Daha derindeki kristallerin mukavemetine kıyasla kristal sınır kütlesi daha yüksek bir mukavemet arz eden malzemelerde ise koşullar biraz daha değişiktir. Bu durumda daha ziyade kristaller içindeki malzeme kaymaları şekil değiştirme safhasına neden teşkil etmektedir. Diğer taraftan kristal sınır kütlesi bağımsız kristaller arasında bir tür sabit iskelet oluşturduğundan bu iskelet yapısı bozulduktan sonra kristaller şekil değiştirebilmektedir. Kristaller arası şekil değiştirme safhasının ( tane sınırlarında dengenin bozulması ) düşük şekil değiştirme hızları ile yüksek sıcaklıklarda ortaya çıktığı bir çok deneylerle kanıtlanmıştır. Şekil değiştirme hızlarının daha yüksek ve

sıcaklıkların düşük olması halinde de plastik şekillendirme sırasında şekil değiştirme safhaları izlenebilmektedir.



## 2 HADDELEME İLE PLASTİK ŞEKİLLENDİRME

### 2.1 HADDELENEBİLME KABİLİYETİ

Metal ve alaşımlarının plastik deformasyonu ile ilgili ana şekillendirme özelliği; hadde ile çekilebilme kabiliyeti yani bir metalin kırılmadan deforme edilebilme kabiliyetidir. Sürekli deformasyon, deformasyona neden olan kuvvetler kaldırıldıktan sonra bir metalin biçiminde ortaya çıkan değişimdir.

Katı hal fiziği ve metallerin fiziğinin bir parçası olan plastik deformasyon teorisi, son zamanlarda modern araştırma metodlarının uygulanması sayesinde oldukça fazla gelişmiştir.

Katı haldeki bütün metaller kristal bir yapıya sahiptirler. Normal koşullarda metal ve alaşımların katılaşması kristal tane artmasıyla başlar. Büyüme esnasında her kristal düzenli bir şekilde hareket eder. Tane (kristal) sınırları komşu kristaller arasındaki temas yüzeyleridir. Böyle bir yapı Polikristal olarak adlandırılır.

Tane sınırları; oksit, kükürt ve silikat gibi genelde kolayca eriyen bileşenleri içeren kristaller arası maddeler çok sayıda fazlar ve çözünmeyen yabancı maddelerin konsantrasyonundan oluşurlar. Polikristal katıların sertliği büyük ölçüde kristaller arası maddelerin dağılımlarına ve çok sayıdaki fazlara bağlıdır.

Katı haldeki metaller sürekli deformasyona uğradıklarında, kristal kafesteki atomlar arası mesafeler atomların kararlı dengelerinin bozulması sonucunda değişirler. Yüksek bir plastik deformasyon derecesinde elastik deformasyon elementleri de kristallerin yönelimleri ile birlikte deformasyon doğrultusunun belirli bir uygunluğunda birleştirilerek incelenirler.

Deformasyon; polikristal yapıdaki katıların taneleri boyunca öyle bir şekilde yayılır ki deformasyona yol açan kuvvetlerin doğrultularına en çok karşılık vererek yönelmiş olan taneler ilk olarak deforme olurlar. Daha sonra deformasyon komşu tanelerin etkisiyle yönelimlerini, kayma yüzeylerinin doğrultusunda değiştiren diğer taneleri kapsar.

Belirli koşullar altında tanelerin kendi deformasyonlarına ilaveten kristaller arası bir deformasyon da meydana gelir. Daha yüksek sıcaklıklarda kristaller arası kolay eriyen yabancı maddelerin konumuna bağlı olarak kristaller arası deformasyon için daha elverişli koşullar yaratılır.

Kristalografik düzlemde atomlar tekrar tekrar paralel düzlemlere bölünerek düzgün biçimli, komşu atomlar arası mesafesi sabit olan, üç boyutlu kristal birim hücrelerinden kafes oluşturan bir atomik kafes şeklinde düzenlenmişlerdir. Demir iki ayrı yapıya sahiptir. Yüzey merkezli, kübik yapıdaki gama demiri (östenit) (Atomlar kübik hücrenin her altı yüzeyinin köşelerinde ve merkezinde yer alır.) ve hacim merkezli, kübik yapıdaki alfa demiri (Ferrit) (Kübik hücrenin köşelerinde sekiz atoma ilave olarak hücrenin merkezinde de bir atom vardır.)

Böyle bir yapı sadece bir tek kristalin sınırlarında ortaya çıkar. Gerçek bir polikristal katıda birleşen tek kristaller, bölge yönelimleri bakımından farklılık gösterirler. Tek kristal veya polikristal numunesine plastik deformasyon yapıldığında, numunenin parlatılmış yüzeyinde akış çizgileri gözlenebilir.

Deforme olmuş tek kristalde kayma, en sıkı bağlanmış bir dizi kristalografik düzlem boyunca meydana gelir. Bu durum yüzey merkezli kübik kafeste sekiz yüzlü piramidin bulunduğu düzlem boyunca hacim merkezli kübik kafeste oniki yüzlü eşkenar piramidin olduğu düzlemlerde meydana gelir.(Yurci,1992)

Plastik deformasyon bazen kayma veya makaslamayla ilişkili olmayan paralel çizgiler şeklinde de olabilir. Bu olaya ikizlenme denir.

A. Bochvar aşağıdaki plastik deformasyon tiplerini ayırt etmiştir.

Yeniden kristalleşme ile kristaller arası yer değiştirme

Erime ve çözünme ile sınır tabakada yer değiştirme

Amorf difüzyon yer değiştirmesi

Polikristal katıların tane ve kristalografik düzlemlerdeki düzensiz dağılımla karakterize edilen plastik deformasyonları, maksimum teğetsel gerilmenin olduğu düzlemlerdeki makaslamalar sonunda ortaya çıkar. Bu makaslamalar, deformasyona yol açan kuvvetlerle  $45^\circ$ 'lik bir açı yapan kayma düzlemleri üzerindeki ilk noktalarda meydana gelirler. Deformasyona devam edilmesiyle, yeni makaslamaların gelişimine uygun olan doğrultulardaki diğer tanelerin yönelimindeki değişmelerin sonucunda, yenilerinin oluşmasına bağlı olarak kayma düzlemlerinin sayısı artmaktadır. Yeni kayma düzlemleri önceden oluşturulanlarla kesişirler ve makaslama düzlemlerinde çökelme yaşlandırması olur. Kristal kafes şekli ve atomik mesafe ( kafes parametresi ) değişir, atomların kararlı dengeleri bozulur. Plastik deformasyonun ileri safhalarında metalin plastik özellikleri bozulur ve deformasyon mukavemeti artar; metalde gerilme sertleşmesi olur.

Tanelerin karşılıklı olarak birbirlerinin yerini almaları (kristaller arası deformasyon) ve ikizlenme sonucunda polikristalin plastik deformasyonu olur.Tane sınırlarındaki kolay eriyen yabancı maddelerin konumları ve yüksek sıcaklık kristaller arası deformasyon için uygun koşullar yaratır.

Taneler biçimlerini değiştirirken deforme olmuş katının uzamasının yönünde daha çok genişlerler ve Sıra yapısı adı verilen bir yapı oluştururlar. Tane yapısının oluşumu deformasyonun derecesine, oranına ve sıcaklığına bağlıdır. Polikristal metallerin geçerli dayanıklılıkları, bunların çok farklı tane yönelimlerine sahip olmalarına rağmen sabit olarak kabul edilirler.

Metallerin plastik deformasyonunda makaslamalar ilk önce atomların kararlı dengelerinden uzaklaşmış oldukları kristal kafes bölgelerinde gerçekleşir. Kafesteki bu karışıklığa Dislokasyon denir.

Gerilme sertleşmesi olduğu durumda deformasyona karşı direncin artması, daha önce oluşmuş olanlar ile kesişen yeni kayma satırlarının oluşmasına bağlıdır. Plastik deformasyonda, kristallerden bazılarının belirli bir açı boyunca dönmeleri (ikizlenme durumunda gerçekleşen işlem) gözlenmektedir. İlk aşamada ikizlenen kısımlar, düşük deformasyon dereceleri ve yüksek deformasyon oranındaki kesme satırlarının oluşumuna dahil olmayan tanelerdir.

Metal numuneler üzerindeki çok sayıdaki gerilme testleri yüksek sıcaklıklarda ve farklı deformasyon koşullarında şu sonuçları ortaya çıkardı.(Burtsev, 1973)

a) Yüksek bir sıcaklık derecesinde (800°C'nin üzerinde) maksimum gerilme ve orantılı limit değerleri deformasyona yol açan kuvvetler azaltıldığında çakışır.

b) Deformasyona karşı direnç, deformasyon oranının artması ile artar. (Soğuk deformasyon durumunda deformasyonun etkisi oldukça düşüktür.)

c) Deformasyon oranının artmasıyla deformasyona karşı direnç sadece %20-30 civarında artar ve sonraki deformasyonlar boyunca değişmeden kalır.

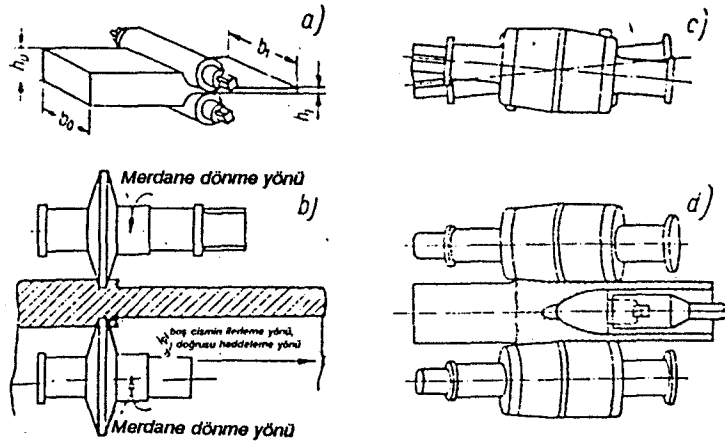
## 2.2 HADDE TÜRLERİNE GÖRE PLASTİK DEFORMASYON

Bir malzemeye arzu edilen son şekli vermeye yarayan bir çok olanaklardan biride plastik şekillendirmedir.Bu yöntem, malzemenin uygun yükteki basınç kuvvetleri ile yüklenmesi esasına dayanmaktadır.

Haddeleme sırasında dönen merdaneler arasında bulunan haddelenen malzemeye plastik şekil vermek suretiyle iş parçası arzu edilen formu alır. Prensip olarak üç hadddeleme türü ayırt edilmektedir.

- a) Boyuna haddeleme
- b) Enine haddeleme
- c) Eğik haddeleme

Eksenleri birbirine paralel ve zıt yönlü dönen merdaneler arasında haddelenen malzemeye şekil verilmesine Boyuna haddeleme denilmektedir.



Şekil 2.1- Çeşitli haddeleme yöntemlerinde prensip olarak merdanelerin düzenlenmesi.

Haddelenen malzeme ile merdane arasında meydana gelen sürtünme sonucunda haddelenen malzeme, haddeleme boşluğuna çekilir ve iş parçası arzu edilen şekle getirilir. Bu şekil değişiminde uzunluk ve genişliğin büyümesine karşın, haddelenen malzemede başlangıçtaki "h" yüksekliği çıkış yüksekliğine "h1" düşer. Bu arada genişliğe oranla boy çok fazla artar. Boyuna haddelemede haddelenen malzeme genellikle merdane eksenlerine dikey olarak hareket etmektedir. Bu tür plastik şekil verme yönteminde malzeme genellikle aynı yönde bir akış göstermektedir. Enine haddeleme ve Eğik haddeleme suretiyle genellikle içi boş cisimler, demir topaklar veya borular imal edilmektedir. Enine haddelemede haddelenen malzeme sadece kendi eksenini etrafında dönmekte ve malzeme de bunun sonucu olarak enine doğru akmaktadır. Enine haddeleme yöntemi; iş merdanelerinde eksenlerin birbirine karşın meyilli olması nedeniyle yuvarlak kütüğün sadece kendi eksenini etrafında dönmesi, malzemenin boylamasına olmak üzere ileriye doğru sürülmesi esasına dayanmaktadır. Bu iki hareketin üst üste binmesi sonunda malzemeye de bir vida eğrisine göre plastik bir şekil verilmiş olmaktadır. Enine haddeleme örneğin; çapı çok büyük, dikişsiz ve et kalınlığı fazla olan boruların haddelenmesinde de görüleceği üzere çok seyrek uygulanmaktadır. Buna karşın eğik haddeleme yöntemi daha fazla yaygındır ve özellikle dikişsiz boruların imalinde büyük önem taşımaktadır. (Çapan, 1977)

Haddeleme süresince malzemenin dış şekli mekaniksel yolla değişikliğe uğramaktadır. Sadece mekanik türde olan bu safhalarla birlikte haddelenen malzemede fiziksel özelliklerin değişmesine neden olan yapı değişiklikleride ortaya çıkmaktadır. Bu durumlar ;

a) İlk malzeme olarak döküm blokların kullanılması nedeniyle malzemede yapı farkları

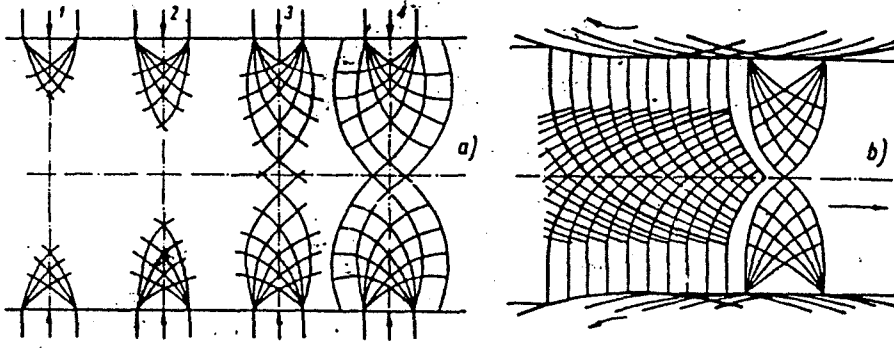
b) Sıcak şekillendirme sonunda metal malzemelerde ortaya çıkan özelliklerle malzeme yapısındaki değişimler

c) Soğuk şekillendirme nedeniyle metal malzemelerde meydana gelen özelliklerle malzeme yapısındaki değişmeler (pekleşme vb.) (Wusatowski, 1963)

## 2.3 PLASTİK ŞEKİLLENDİRMEDE METALSEL MALZEMELERDE MEYDANA GELEN TEMEL SAFHALAR

Bağımsız malzeme parçaları arasındaki bağlarda bir ayrılma olmadan durumlarını kalıcı olarak değiştirebilen katı cisimlere plastikleşen cisimler denilmektedir. Plastik şekil verme işlemi, komşu malzeme parçalarının birbirlerine karşı kaydırılması ve malzemenin bir yerden başka yerlere doğru ötelenmesi esasına dayanmaktadır. Malzeme ötelenmelerindeki büyüklüğü tesbit etmek bakımından şekil değiştirme koşulları ile şekil değiştirme türü esas alınmaktadır. Bu arada içeride malzeme parçaları arasındaki bağlarda hiçbir şekilde kopma meydana gelmesine izin verilmez. Bu nedenle plastikleşme kabiliyeti yeter derecede yüksek olduğu sürece metal malzemeler plastik olarak şekillendirilebilir; daha doğrusu kırılmadan oldukça yüksek şekil değişikliklerine dayanabilen metal malzemeler şekillendirilebilir. Bağımsız malzeme parçalarının birbirlerine doğru kayması, yumuşak çelikte şekil değiştirme başlangıcında akma sınırına ulaşıldığı anda bir asitlenme yöntemi ile kayma eğrilerinden yararlanmak suretiyle görülebilir hale getirilebilir.

Tane sınır kütlesi çok ince ise polisaj yardımı ile kesiti belirlenen kristal tanelerinde kayma eğrileri meydana gelmesi nedeniyle, polisaj edilmiş yüzey gitgide matlaşacaktır. Dış kuvvetlerin etkisi ile malzemede kaymalar meydana gelmektedir. Bu kaymalar etki eden kuvvetlerin büyüklüğü ile orantılıdır. Her kristal tanesinde yönleri kristalografik olarak belirlenen kayma eğrileri meydana gelmektedir. Buradan, kalıcı bir şekil değiştirmenin sadece tane sınırlarında dengenin bozulması suretiyle meydana gelmediği bilakis bu denge bozulmasının bağımsız kristal tanelerinde tüm kesiti kapsadığı sonucuna varılmaktadır. (Wusatowski, 1963)



Şekil 2.2 Çelik bir deney çubuğunda yüzeyde kayma çizgilerinin oluşması

a) Yığıma esnasında b) Soğuk haddeleme esnasında

## 2.4 ÇOK KRİSTALLİ ve TEK KRİSTALLİ YAPIDA PLASTİK ŞEKİLLENDİRMEDE MEYDANA GELEN SAFHALAR

Her metal malzeme çok kristalli olup bu çok kristallerde çok sayıda bağımsız kristal tanelerinden oluşmaktadır. Bu kristal taneleri, tane sınırlarında birbirleri ile doğrudan temas halindedir veya belirli olarak teşekkül eden tane sınır kütleleri ile bu kristal taneleri birbirlerinden ayrılmıştır. Bu tane sınır kütleleri prensip olarak gerçek kristallere oranla daha fazla katı maddeleri ihtiva ettiğinden, kristal tanelerindeki ergime sıcaklığına kıyasla genellikle bu madde de ergime sıcaklığı daha düşüktür. Kristallerden oluşan malzemelere plastik olarak şekil verilirken aşağıdaki safhalar meydana gelir.

a) Kristallerde tane sınırlarında kuvvetler dengesinin bozulması (kristaller arası şekil değişmesi)

b) Kristaller içerisinde kuvvetler dengesinin bozulması (Kristaller içerisinde şekil değişmesi)

c) Bağımsız kristallerin parçalanması

Gerçek kristal tanelerindeki mukavemete oranla kristal sınır kütleleri daha düşük bir mukavemete sahip olan metal malzemelerde; şekil değiştirme safhası genellikle bağımsız kristallerin bir birine karşı kaydırılması suretiyle yerine getirilmektedir. Daha derindeki kristallerin mukavemetine kıyasla kristal sınır kütleleri daha yüksek bir mukavemet arz eden malzemelerde ise koşullar biraz daha değişiktir. Bu durumda daha ziyade kristaller içindeki malzeme kaymaları şekil değiştirme safhasına neden teşkil etmektedir. Diğer taraftan kristal sınır kütleleri bağımsız kristaller arasında bir tür sabit iskelet oluşturduğundan bu iskelet yapısı bozulduktan sonra kristaller şekil değiştirebilmektedir. Kristaller arası şekil değiştirme safhasının ( tane sınırlarında dengenin bozulması ) düşük şekil değiştirme hızları ile yüksek sıcaklıklarda ortaya çıktığı bir çok deneylerle kanıtlanmıştır. Şekil değiştirme hızlarının daha

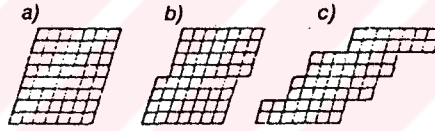
yüksek ve sıcaklıkların düşük olması halinde de plastik şekillendirme sırasında şekil değiştirme safhaları izlenebilmektedir.

Kristalcikler içerisinde meydana gelen şekil değiştirme safhası, tek kristallere plastik şekil verilmesi halinde söz konusudur. Çok sayıda yapılan araştırmalara dayanarak tek kristallere plastik şekil verme sırasında ilk belirti olarak kayma eğrilerinin meydana gelmesi, kayma düzlemlerinin mevcut olduğuna dair bir kanıt olarak geçerlilik kazanmaktadır. Aynı zamanda bu araştırmalar sayesinde aşağıda verilen iki safhanın, tek kristallerde ortaya çıkan plastik şekil değiştirme mekanizmasına temel teşkil ettiği hususunda ayrıca kanıtlanmış olmaktadır.

a) Parçacıkların, sabit ve kristalografik olarak belirlenen tercihli kayma düzlemleri boyunca kayması (kayma olayı)

b) İkiz oluşması

Tek kristal içerisinde bulunan bağımsız tabakalar adı verilen bir kristal sistemini (Şekil 2.3. a) tanımlayan belirli ve tercihli kayma düzlemleri boyunca kaymaktadır. Bu arada şekil 2.3 b ve 2.3.c de gösterildiği gibi çeşitli kayma düzlemleri teşkil edebilen ve durumlarını değiştirmeyen bağımsız tabakalar kayma hareketi yapmaktadırlar.

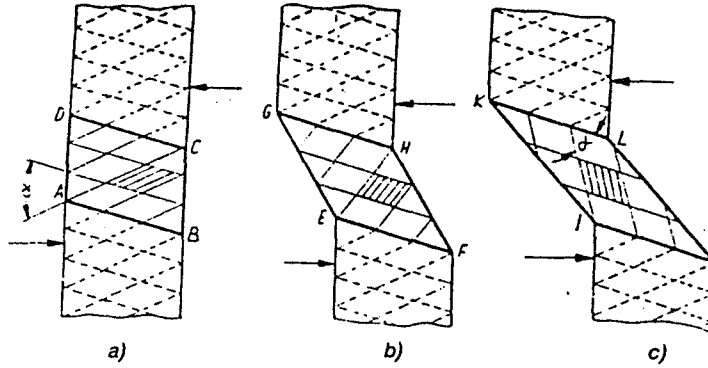


Şekil 2.3 Bir kristal tanesinde kayma olayının şematik olarak gösterilmesi.

İkiz oluşmasında ise kristallerin belirli kısımların da diğer parçacıklara karşı bir dönme hareketi meydana gelmektedir. Bu arada kayma hareketi yapan parçacıklar şekil 2.4 de görüleceği gibi parçacıktaki konumlarına göre simetrik bir vaziyet almaktadır. ABCD rombik şekil arz eden ve formunu değiştirmeyen bir kristal ikiz teşekkülü nedeniyle plastik şekil değiştirme sonunda EFGH, daha doğrusu IJKL rombiğine dönüşmektedir.

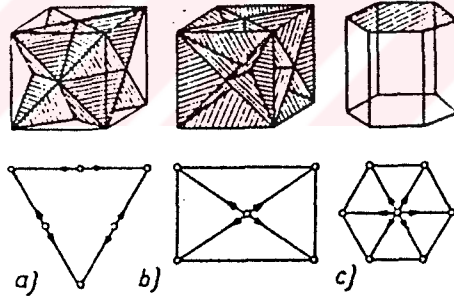
Hemen hemen tek kristalin tümünde şekil değiştirme sırasında ve her metal malzemede olduğu gibi sayıca çok fazla olan kristallerden oluşan bir birim içerisinde bu kayma hareketi görülmektedir. Buna mukabil ikiz teşekkülü sadece birkaç metalsel malzeme ve alaşımlar için sınırlanmıştır. Metal parçacıklarında kayma hareketinin görüldüğü kayma düzlemlerinin, verilen kristalle ilgili belli kristalografik düzlemlerle çakıştığı uygun deneylerle ispat

edilmiştir.(Tercihli yüzeyler ve bu yüzeylerle ilgili yönler) Kristal için tipik olan bu kayma düzlemlerinde görüleceği gibi çok az bir kayma direnci ortaya çıkmaktadır. (Şekil 2.5) Etki eden kuvvet yönüne göre bu kayma düzlemlerinin tercihli olarak yönlenmesi, bağımsız kristallerde akma sınırında meydana gelen gerilme değerini etkilemektedir.



Şekil 2.4 Plastik şekillendirme sırasında ikiz oluşmasına ilişkin safhanın şematik olarak gösterilmesi.

a) Başlangıç durumu      b) Geçiş durumu      c) Nihai durum



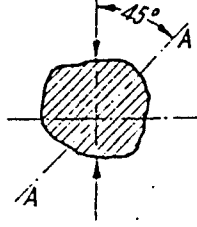
Şekil 2.5 Muhtelif kristal kafeslerde kayma düzlemleri ile kayma yönleri

a) Yüzey merkezli kübik      b) Hacim merkezli kübik      c) Hegzagonal

Örneğin; bir çekme zorlamasında kayma düzlemi ile en yüksek gerilmelerin etkelediği yüzeyin aynı doğrultuda olmak üzere çakışması halinde kayma direnci çok küçüktür. Bu durum şekil 2.6 da gösterildiği gibi kayma düzleminin kuvvet doğrultusu ile  $45^\circ$  lik bir açı teşkil etmesinin zorunlu olduğu anlamına gelmektedir.

Bunun ötesinde bu deney sonuçları akma sınırındaki dirençlerin belirli doğrultularda daha küçük, buna karşılık başka doğrultularda ise daha da büyük olduğunu göstermektedir. Çok

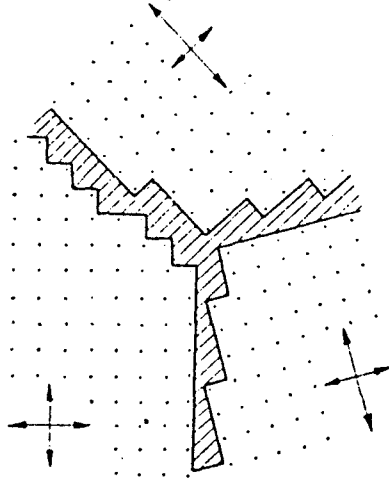
kristalli denilen yani çok sayıdaki kristallerden oluşan metal malzemelerde, bağımsız kristaller farklı yönlerdedir. Kuvvet yönüne karşın farklı yönde olan bu bağımsız kristal tanelerinde ortaya çıkan artma dirençlerinin toplamı, şekil değiştirme esnasında ortaya çıkan direnci oluşturmaktadır. Farklı yönlerde olan ve çok sayıda kristallerden oluşan pek çok kristalde ilk önce kristal taneleri şekil değiştirir



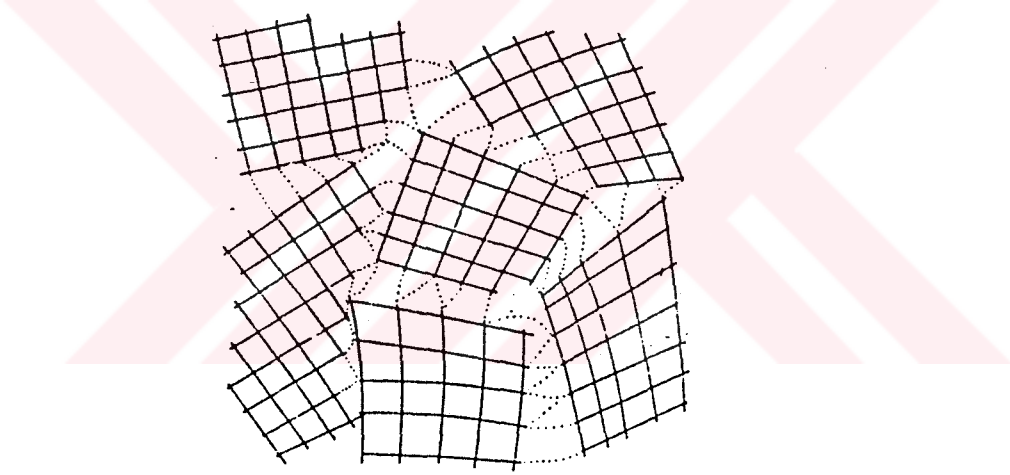
Şekil 2.6 Bir kristal tanesinde kayma düzlemleri ile maksimum kayma gerilmesine ilişkin kuvvet doğrultusu.

Etkileyen kuvvet yönü ile  $45^\circ$  lik bir açı teşkil eden ve maksimum kayma gerilmelerinin bulunduğu düzlemlerle bu kristal tanelerindeki kayma düzlemleri ve tercihli kayma yönleri aşağı yukarı birbirine paraleldir. Tedricen ilerleyen şekil değiştirme esnasında gerilme yönlerine daha az uygun olan kayma düzlemlerinde kayma safhaları ortaya çıkmaktadır. Bu bakış açısından hareketle, sayıca daha az veya daha çok kayma düzlemi teşkil etme kabiliyetine göre bir metalin plastik olup olmadığı belirlenebilir. Bu kabiliyetin tümüyle noksan olması halinde malzeme kırılığandır. Böylece bir malzemede kayma düzlemleri ne kadar fazla ise bu malzemeninde o nispette fazla plastikleşme hassasiyetine sahip olduğu söylenebilir.

Çok kristalli yapının plastik şekillendirmesinde ortaya çıkan safhalar incelenirken bağımsız kristallerin mevcut tane sınırı kütlesi ile birbirlerinde ayrılacakları hususuna dikkat edilmelidir. Bununla birlikte, bu tane sınır kütlesi aynı zamanda kristalleride birbirine bağlamaktadır. (Şekil 2.7) Daha derinde bulunan diğer kristallerle çok sıkı bir şekilde sarılı olan bir kaç kristali yükseltmek suretiyle birbirine komşu kristal taneleri arasında iyi bir bağ oluşturulmasında tane sınır kütlesi önemli görev üstlenmektedir. (Şekil 2.8)



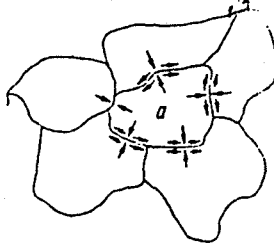
Şekil 2.7 Bir çok kristal içerisinde tane sınırlarının konumu ile kristallerde kristalografik yönlere ait örnekleme.



Şekil 2.8 Plastik şekil değişiminden sonra çok kristalli yapının şematik olarak gösterilmesi. Bağımsız kristallerdeki kafes uzunluğuna doğru uzatılmış veya elastik olarak gerdirilmiştir. Tane sınırlarındaki dişler komşu kristaller arasında bir gerinme durumu oluşturmaktadır. Gerçek durumlara oranla bu şematik olarak gösterme biçimi çok kuvvetli bir şekilde büyütülmüştür.

Dış kuvvetler çok kristale etki ettiğinde ilk önce kayma düzlemleri kuvvet yönüne  $45^\circ$  meyilli olan kristaller, plastik olarak şekil değiştirmeye başlamaktadır. Bu tür bir kristal nasıl şekil değiştiriyorsa, bu kristalde komşu kristaller üzerinde aynı ölçüde bir kuvvet uygulamasına geçecektir. Böylece bağımsız kristaller arasında gerilmeler meydana gelmekte ve bu

gerilmelerde diğer kristal tanelerinde plastik bir şekil değiştirme safhasını başlatmaktadır. (Şekil 2.9)



Şekil 2.9 Çok kristal yapısında bulunan bağımsız kristal taneleri arasında meydana gelen gerilmeler.

Böylece şekil değiştirme süresince kayma proseslerinin ceryan ettiği kristal tanelerinin sayısı artar. Bu safhanın tüm malzeme hacmini içine aldığı halde kristal gruplarının tümünde kaymalar meydana gelir. Bu kristal gruplarının oluşması ile birlikte kristal taneleri parçalanır ve böylece daha küçük kristaller meydana gelir. Kayma düzlemleri boyunca bir kristal parçalanması ortaya çıkmaktadır.

Şekil değiştirme safhasının devam etmesi tüm kristallerde eksenlerin tedrici olarak doğrultulmasına, haddelemede olduğu gibi metale etki eden şekil değiştirme kuvvetleri istikametinde eksenlerin döndürülmesine neden teşkil etmektedir. Bu arada az veya çok paralel epipedik şekil alan kristaller başlangıçtaki formlarını kaybeder ve haddeleme yönünde uzunluğuna doğru artan bir şekil alırlar.

Kristal taneleri arasındaki tane sınırı ortadan kalktığında böyle bir metal malzeme lif şeklinde bir yapı karakteri arz etmektedir. (Şekil 2.10) Bu tür bir yapıya sahip olan metal malzemeler, uzunlamasına ve enine istikametlerde farklı özellikler gösterdiğinden deney esnasında bu hususa ayrıca dikkat edilmelidir.

(Wusatowski, 1963)



Şekil 2.10 Kuvvetli bir şekilde plastik şekil değiştirmeden sonra yumuşak bir çelikte meydana gelen lifli yapı.Şekil değiştirme derecesi % 94.380 defa büyütülmüştür.

## 2.5 METALSEL MALZEMELERDE PEKLEŞME ve ŞEKİL DEĞİŞTİRME

Plastik şekil verme işlemi pratikte oda sıcaklığında soğuk olarak şekillendirme veya soğuk şekil verme diye tanımlanmaktadır. Plastik şekillendirmede metal malzemenin aldığı yapı ile malzeme özelliklerinin korunması, bu tür bir şekil vermeyi belirlemektedir. Metal bir malzemeye soğuk olarak şekil verilirken malzeme özelliklerine önemli ölçüde etki edilmektedir. Çeşitli türdeki çeliklerle metallerde yapılan deneylerde plastik olarak soğuk şekil verme sırasında özellikle küçük şekil değiştirme derecelerinde, bu malzemelerde mekaniksel özelliklerin değiştiği görülmüştür. Şekil değiştirme adı altında yeniden kristalleşme için gereken sıcaklık ve süre göz önüne alınmak koşulu ile metal malzemeye plastik şekil verilirken ortaya çıkan tüm kalıcı değişmelerin toplamı anlaşılmalıdır. Eğer hiç bir şekilde yeniden kristalleşme safhası ortaya çıkmıyorsa bu durumda soğuk bir şekillendirme olayı söz konusudur. Şekil değişikliğinin artmasıyla malzemenin çekme mukavemetinde artma meydana gelmektedir. Şekil değişikliği sert çeliklere oranla yumuşak çeliklerde soğuk şekillendirme sonunda çekme mukavemetine daha fazla etki etmektedir. Bu deneyler neticesinde şekil değişkenliğinin artmasıyla birlikte, çekme mukavemetine oranla akma sınırının daha çabuk yükseldiği tesbit edilmiştir. Bu durum soğuk şekillendirme derecesinin artmasıyla, akma sınırı ile çekme mukavemeti arasındaki farkın daha da küçüldüğü yani akma sınırındaki oranın bire doğru yaklaştığı anlamına gelmektedir.

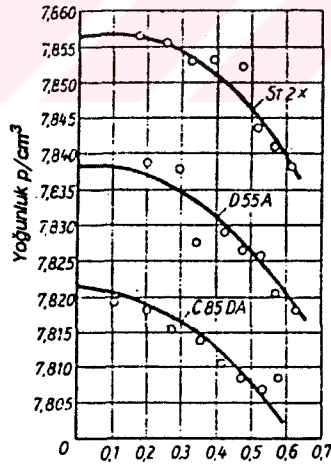
Soğuk şekillendirme esnasında şekil değiştirme kabiliyeti kaybolacak, hatta en sonunda çok kırılğan olacak şekilde metal malzemede plastikleşme hassasiyeti gittikçe azalacaktır. Plastik şekillendirmede yeniden kristalleşme için gerekli olan sınır değerleri altındaki malzeme mukavemeti ile sertlikteki artışa Pekleşme denir. Şekil değiştirme derecesi % 50-60 arasında

olan bir değere ulaştığında malzemede ortaya çıkan bu pekleşme hali önemli ölçüde azalmaktadır.

Pekleşme diyagramları ; soğuk şekil verme yönteminde iş akışının tesbit edilebilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Böyle bir diyagramdan, her şekil değiştirme kademesine göre işlenen metal malzemede mekaniksel özellikler belirlenebilir. Pekleşme safhası analiz edilmek istendiği takdirde, bu değerlerin kapsadığı bilgilere gerek duyulur.

Soğuk şekillendirmede, çelikte elektromanyetik gibi belli fiziksel özelliklere de etki edilmektedir. Çelikte mıknatıslanma ve mıknatısiyetin ortadan kalkma kabiliyeti ile yoğunluk değişmektedir.

Şekil 2.11 de, şekil değişiminin artmasıyla birlikte çelikte yoğunluğun düştüğü yani metalde özgül hacmin arttığı sonucuna varılmaktadır. Bununla beraber bu değişiklikler pratikte ihmal edilebilecek düzeyde kalmaktadır. Soğuk şekillendirmede metal bir malzeme yapısı oldukça önemli değişikliklere uğramaktadır. Bir deney parçasındaki şekil değişimi ile deney parçasında bulunan bağımsız kristal taneleri arasında belirli bir ilişki bulunmaktadır. Bu deney parçası soğuk olarak şişirilirken, bağımsız kristallerde aynı şekilde yığılmaktadır. Buna karşın deney parçası çekme kuvvetleri etkisi ile şekil değiştirirse bağımsız kristallerde çekme zorlamasına uğramaktadır. Başlangıçta eksenleri ile birlikte farklı bir şekilde yönelmiş olan kristal taneleri, soğuk şekillendirme sırasında kristalografik olarak doğrultulmakta ve etki eden kuvvet yönünde olmak üzere tercihli bir yön almaktadır.



Şekillendirme derecesi

Şekil 2.11 Çeliğin özgül ağırlığının soğuk şekillendirme ile değişimi

Böyle bir şekillendirmeden sonra (örneğin soğuk haddelemeden sonra) metal bir malzeme içerisinde ortaya çıkan değişiklikler nedeniyle, malzemede enine ve boyuna

istikametlerde meydana gelen özelliklerin aynı kaldığını ifade etmek oldukça güçtür. Farklı bir şekilde yönelmiş olan kristal tanelerden oluşan metal bir malzemede, mekaniksel özellikler genellikle yönle ilgili değildir. Bağımsız kristal tanelerinde kristal eksenlerinin doğrultulması ve kristal tanelerinin tercihli bir yöne oryantasyon edilmesi, soğuk olarak şekillendirilen metal malzemede farklı ve yönle ilişkili olan mekaniksel özelliklerin meydana gelmesine neden olmaktadır. Böyle bir metal yapısı Anizotrop olarak tanımlanmaktadır.

Plastik işleme proseslerinin her türünde üniform olmayan deformasyonlar meydana gelir. Bu üniform olmayan deformasyon çalışılan ve kullanılan metallerin her ikisinde de şekil, malzemenin boyutları, deformasyon derecesi vb. gibi faktörlerin etkilerine bağlıdır. Kullanılan malzeme ve iş parçası arasında yüzeyde sürtünme ve işlenen malzemenin plastik özelliklerinin üniform olmasını engelleyen fiziksel, mekaniksel ve kimyasal özelliklerin homojenliği özel önem taşıyan faktörlerdir. Üniform olma özelliğinin bozulması aynı zamanda sıcak işleme esnasında üniform olmayan ısıtma veya soğutmadan dolayı da olabilir. Deformasyonun üniform olmaması, haddelenebilme kabiliyeti düşük olan bir metalde sürekliliğin bozulmasına veya artık gerilmelerin oluşmasına yol açar.(Tarnovski, 1965)

## 2.6 YENİDEN KRİSTALLEŞME

Soğuk şekillendirme sırasında metal malzemelerde çeşitli özellikler değişikliğe uğramaktadır. Malzemede plastikleşme kabiliyeti azalmakta, manyetik direnç, koersif kuvvet ve diğer özellikler artmaktadır. Arzu edilmeyen bu değişiklikler uygun bir ısıl işleme tavlama suretiyle giderilebilir. Her soğuk şekillendirmeden sonra normal olarak tavlama yapılır.

Şekillendirme derecesi yüksek olduğu takdirde her plastik şekillendirmeden sonra yeniden kristalleştirme tavlama yapılacak şekilde tüm şekillendirme safhası bir çok kademelere bölünür. Bu yeniden kristalleşme tavi, ara tavlama olarak da tanımlanmaktadır. Soğuk şekillendirilen malzeme de başlangıç ve çıkış ölçülerine göre bazen daha sık olarak soğuk şekil verilmeli ve ara tavlama yapılmalıdır.

Bu tavlama sayesinde soğuk şekillendirme sonunda ortaya çıkan değişikliklerin kısmen veya tamamen ortadan kaldırılmasıyla başarıya ulaşılabilir. Bu husus seçilen tavlama sıcaklığına bağlıdır. Şekil değiştirme, metal malzemede kristal yapı içerisinde meydana gelen ötelemelerin sonucudur. Bu ötelemeyi önlemek bakımından malzemelerin atomlarının yerdeğiştirebildikleri bir ortama girilmesi zorunludur. Isı şeklinde bir enerji vermek suretiyle bu duruma ulaşılır. Plastik şekillendirme, cisimlerin kristalleri içerisinde bir enerji birikimine neden olmaktadır. Bu enerji birikimi ne kadar büyük ise, metal iyonlara yerdeğiştirme kabiliyeti kazandırmak üzere o nispette az miktarda ilave bir ısı enerjisine ihtiyaç vardır. Çünkü soğuk

şekillendirme sonunda meydana gelen değişikliklerin ortadan kaldırıldığı sıcaklık, malzemedeki şekil değiştirme derecesinin büyüklüğü oranında azalmaktadır.

Soğuk şekillendirilmiş çelik ısıtılınca elektrik direnci, pekleşme vb. gibi soğuk şekillendirme sonunda değişen malzeme özellikleri değişmeye ve şekil değiştirmeden önce mevcut olan ilk değerlere yaklaşmaya başlamaktadır. Bu arada soğuk şekillendirilen metal malzeme yapısında henüz hiç bir değişiklik görülmez. Bu olaya Kristal Kuluçkası denir. Kristal kafes içerisinde soğuk şekillendirme sırasında özellikle kuvvetli bir biçimde şekil değiştiren bölgelerde ortaya çıkan iç gerilmelerdeki çözümler bu olayın esasını teşkil etmektedir. (Tablo 2.12)

Tablo 2.12 Farklı yağlama maddeleri ile çeşitli malzemelerin soğuk olarak haddelenmesinde ortaya çıkan sürtünme kat sayıları. (Wusatowski, 1963)

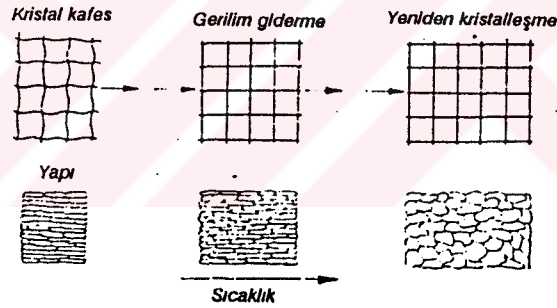
Malzeme	Yağlama Maddesi		
	Yağlama Yapılmadan	Petrolle	Hafif Makine yağı ile
Çelik 10 .....	0,20...0,30	0,15...0,17	0,10...0,13
Bakır .....	0,20...0,25	0,13...0,15	0,10...0,13
Alüminyum .....	0,20...0,30	0,10...0,15	0,08...0,09
Prinç .....	0,20...0,25	0,10...0,15	0,08
Çinko .....	0,25...0,30	0,12...0,15	0,09

Yeniden kristalleşme sırasında kristaller içerisinde ve tane sınırlarında atomların difüzyonu artmaktadır. Başka bir deyişle şekil değiştirmedeki büyüklük, yeniden kristalleşme sırasında difüzyon safhalarına ilişkin süre ile metal malzeme içerisindeki kimyasal terkip farklarının dengelenmesine etki etmektedir.

Şekil değiştirme derecesinin artırılması ve tav süresinin uzatılması ile yeniden kristalleşme sıcaklığı daha düşük seçilebilmektedir. Yeniden kristalleşme olayında malzeme iki komponentden meydana gelir. Komponentlerden birisi henüz özellikleri değişmemiş, yeniden kristalize olmamış ve henüz dayanıklılık kazanmış malzeme, diğeri de çoktan rekristalize olmuş ve sertliği giderilmiş malzemedir.

Bu arada yeniden kristalleşme safhasında sıcaklığın muhtelif malzeme özelliklerini farklı bir biçimde etkilediğine dikkat edilmelidir. Örneğin; başlangıçtaki elektrik direncinin elde edilmesinde gereken yeniden kristalleşme sıcaklığı, dayanıklılığın giderilmesinde gereken yeniden kristalleşme sıcaklığından daha düşüktür. Yeniden kristalleşme sıcaklığı şekil değiştirme derecesine bağlıdır.

Soğuk şekillendirilen çelik ısıtılmaya devam edilirse yapı içerisinde kristalleşme merkezleri oluşmaya başlar. Bu merkezler çabucak büyür ve böylece tüm malzeme yapısı değişir ve başlangıçtaki soğuk şekil vermeden önceki mevcut malzeme özellikleri tekrar ortaya çıkar. Bu kristalleşme merkezinin oluşması hakkında çeşitli hipotezler vardır. Bu merkezlerin sayısı şekil değiştirme derecesine bağlıdır. Küçük şekil değiştirme derecelerinde ancak az sayıda kristalleşme merkezleri meydana gelir. Dolayısıyla bu merkezlerden çoğalan kristallerin büyüklüğü oldukça fazladır. Çünkü çoğalma sırasında kristallerin karşılıklı birbirine engel olma süresi oldukça uzundur. Buna karşın şekil değiştirme daha büyükse bu taktirde çok sayıda kristalleşme merkezleri meydana gelir ve yeniden kristalleşme tavında ince taneli yapı elde edilir. Soğuk şekillendirme de şekil değiştirme derecesi ne kadar yüksek olursa, yeniden kristalleşme safhasının başladığı sıcaklıkta o nispette düşük olmaktadır. Yeniden kristalleşme sıcaklığının düşük olması hususunda şekillendirme sıcaklığının derecesinin etkisi, şekil değiştirme derecelerinin küçük olduğu bölgelerde özellikle fazladır. Şekil değiştirme derecelerinin daha yüksek olması halinde yeniden kristalleşme olayının başladığı sıcaklığın düşük olması hususunda şekillendirmenin etkisi daha azdır.



Şekil 2.13 Yeniden kristalleşmiş metal bir malzeme yapısı.

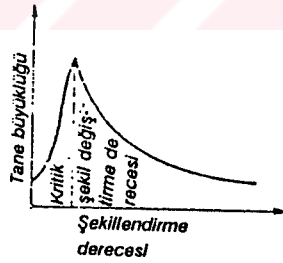
Şekil değiştirme safhasında kristal tanelerin parçalanması ve belirli yönlere doğru uzaması sürerken daha önce söz edilen tercihli yön meydana gelir. Yeniden kristalleşme sırasında bu yapı ortadan kalkar. Şekil 2.13 'de görüldüğü gibi çokgen kesitli kristal taneleri oluşur. Dolayısıyla yeniden kristalleşme sayesinde plastik şekil vermeden önce metal malzemede mevcut olan yapı yeniden tesis edilmektedir.

Malzeme oldukça uzun bir süre tavlandığı taktirde kristal tanelerinde bir irileşme meydana geldiği görülür. Tane irileşmesi diye tanımlanan bu üçüncü görünüm bugüne kadar yeniden kristalleşme safhasından prensip olarak ayrılan bir olay olarak ifade edilmiştir. Tane

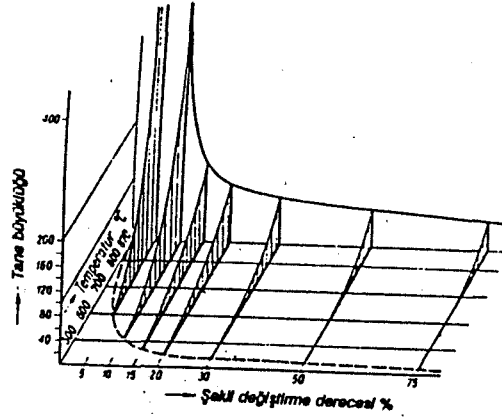
irileşmesi safhasında yeni kristaller sadece mevcut kristalleşme merkezlerindeki sayıya bağlıdır. Bununla beraber tane irileşmesi olayı gayri muntazam bir şekilde kristal tanelerinin birbirleriyle ergiyerek büyümeleri esasına dayanmaktadır. Örneğin; aynı kristal tanesi kendi kristal sınırında bir yerde bulunan komşu bir kristal tanesini kabul edebilir. Buna karşın başka bir yerde diğer bir komşu kristal tanesi ile de kısmen ergiyebilir. Tane irileşmesi sonucunda metal malzemeyi oluşturan kristal tanelerinde tüm yüzey küçülmektedir. Böylece termodinamik stabil bir duruma geçiş söz konusudur.

Soğuk olarak şekillendirilen metal bir malzemede yeniden kristalleşme safhası bir çok kademededen meydana gelir. Yeni yapıda kristalleşme merkezlerinin oluşması birinci kademeyi teşkil eder. Bundan sonra yeni kristal oluşması diye nitelendirilen ikinci kademedeki kristalleşme merkezlerinden kaynaklanan yeni bir malzeme yapısı meydana gelir. Yeniden oluşan kristalleşme merkezlerinin sayısı ile yeni kristallerin irileşmesi gerek şekil değiştirme derecesine gerekse soğuk şekillendirilen malzemenin yeniden kristalleşme sırasında ısıtıldığı sıcaklığa bağlı olarak belirli bir ölçüde sınırlanmaktadır.

Tane büyüklüğü, sıcaklık ve şekil değiştirme derecesi arasındaki ilişki şekil 2.14 -15 ve 16'ncı şekillerde üç boyutlu yani hacimsel olarak gösterilmiştir. Yeniden kristalleşme diyagramlarında görülen bu eğriler, metal malzemenin türüne bağlı olmadan aynı seyri takip etmektedir. Genellikle küçük şekil değiştirme bölgelerinde kritik şekil değiştirme derecesi diye tanımlanan belirli bir şekil değiştirme derecesi ortaya çıkmaktadır. Yani küçük şekil değiştirme derecelerinde kritik tane büyüklüğü denilen maksimum bir tane büyüklüğü elde edilmektedir.



Şekil 2.14 Yeniden kristalleşme tavından sonra tane büyüklüğü ile şekil değiştirme arasındaki ilişki.



Şekil 2.15 Yeniden kristalleşmiş yumuşak bir çelikte tane büyüklüğü ile şekil değiştirme ve sıcaklık arasındaki ilişki.

Kritik şekil değiştirme derecesi malzemeye bağlıdır ve bu şekil değiştirme derecesi % 8 ile % 10 arasındadır. Şekil değiştirme sıcaklığının artmasıyla birlikte bu kritik şekil değiştirme derecesinde şekil 2.15 de görüleceği üzere koordinat sisteminde başlangıçtaki yöne doğru kaymaktadır. Şekil değiştirme derecesi ne kadar yüksek olursa, yeniden kristalleşme tavrından sonra soğuk olarak şekillendirilen malzeme yapısında o nispette ince taneli olmaktadır. Bu nedenle soğuk şekillendirmeden hemen sonra yeniden kristalleşmeyi temin etmek amacıyla bir rekristalizasyon tavlama yapılmaz ise, soğuk şekillendirme sırasında kaba bir yapının oluşmasını önlemek bakımından kritik şekil değiştirme derecesi civarında olan küçük şekil değişikliklerinden sakınılmalıdır.

Soğuk şekil verme safhası başında, yani küçük şekil değiştirme derecelerinde şekillendirme işleminin sadece kristalcikler içerisinde meydana gelen olaylar esas alınmak suretiyle yapılması, kritik şekil değiştirme derecesinin ortaya çıkmasına yardımcı olur. Böylece tane sınır kütlelerinde etkilenmiş olmaktadır. Diğer taraftan bu husus, bağımsız kristal tanelerine plastik olarak şekil verilmesini ve bu kristal taneleri ile ilgili hacimler kafeslerin karşılıklı olarak ötelenmesini kolaylaştırmaktadır. Şekil 2.15 de verilen yeniden kristalleşme diyagramı uzun süre nihai bir diyagram olarak kabul edilmiştir. Belirli bir çelikte çok yüksek şekil değiştirme derecelerinde kristalleşme diyagramında ikinci bir maksimum tane büyüklüğünün meydana gelebileceği yapılan deneylerle tesbit edilmiştir. Tüm bağımsız kristallerin aynı anlamda yönlendirilmeleri sonunda malzemede görülen iç yapı, şekillendirme işleminin büyüklüğü nedeniyle tane sınır kütlelerinin parçalandığı tane sınırlarında, bağımsız kristallerin birbirleriyle kaynaştığı bağımsız tek bir kristale benzemektedir. Böylece az miktarda oldukça kaba yapı kristal taneleri teşekkül etmektedir. Bu iri tane teşekkülü, yeniden kristalleşme tavlama sırasında, yüksek tavlama sıcaklıkları ve uzun süre devam eden duruşlarla

hızlandırılmaktadır. Kristaller arası enerjiler arasında meydana gelen farklar, komşu kristal tanelerinde yüzeydeki eğrileri değiştirmekte, bunlarla ilgili tane sınırlarını kaydırmakta ve tane büyüklüğünün değişmesine neden olmaktadır. (Wusatowski, 1963)

## 2.7 SICAK ŞEKİLLENDİRME

Plastik şekillendirme kısmen veya tamamen yeniden kristalleşme bölgesi içerisinde kalan koşullar altında yapılır ve bu arada yüksek şekil değiştirme hızlarıyla çalışır. Bu durumda eksiksiz bir yeniden kristalleşme olayı mümkün değildir.

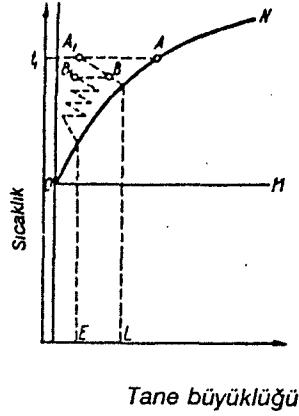
Şekil değiştirme ve yeniden kristalleşme koşullarına uygun olarak metal malzeme iki türlü bir yapı karakteri arz etmek zorunda kaldığından bu durum sadece iç gerilmelerde bir birikime neden olabilir. Bu durum ise metal bir malzemede plastikleşme kabiliyetinin az olması halinde, kopmanın meydana gelmesine neden teşkil edebilir.

Sıcak şekil değiştirme sıcaklıklarının üst sınırı, şekil değişiminde minimum güç artışı ile metalin en iyi plastik özelliklere sahip olacağı şekilde seçilmelidir. Homojen katı çözeltilerin oluşum sıcaklığı biraz aşılmış olabilir. Ancak işleme sıcaklığının alt sınırı, hiç bir zaman ötektoid noktadan daha düşük olmamalıdır. Metaller yeniden kristalleşme ve erime sıcaklıkları arasındaki seviyelerde en iyi haddelenebilme kabiliyetine sahiptirler. Diğer taraftan sıcak işleme, metal tek fazlı bir durumda olduğu zaman, yani faz dönüşüm sıcaklıklarından daha yüksek sıcaklıklarda olduğu durumlarda olmalıdır.

Haddeleme başlangıcı ve sonu sıcaklıkları yumuşak karbon çeliklerinin çoğu için 1260°C ve 950°C, takım çelikleri için 1150°C ve 850°C, orta karbon çelikleri için 1200°C ve 900°C'dir. Haddeleme işlemi yüksek hızlı modern makina düzeneklerinde gerçekleştirildiği takdirde, haddeleme başlangıcı ve sonu sıcaklıkları birbirine yaklaşır. (Tarnovski, 1965)

Sıcak şekillendirme adı altında, yeniden kristalleşme ile birlikte plastik şekil verme anlaşılmalıdır. Şekil 2.16'da gösterilen diyagram, bu arada meydana gelen safhaları belirlemektedir. Diyagramda genel olarak tane irileşmesiyle sıcaklık arasındaki ilişki ve aynı zamanda sıcaklıkla şekil değişikliğinin tane büyüklüğüne olan etkisi gösterilmiştir. OM yatay doğrusu kritik sıcaklığa tekabül etmektedir. Bu sıcaklığın üstüne çıkılmasıyla birlikte yeni kristal tanelerinin teşekkül etmesiyle birlikte, metal malzeme içerisinde yeni bir kristal yapı meydana gelmeye başlar. Sıcaklıkla şekil değişiminin metal malzeme yapısı üzerindeki etkileri, kesik çizgili bir doğru ile gösterilmiştir. Sıcaklık yeter derecede yüksek olduğunda şekillendirme süretiyle ince bir yapıya kavuşan kristal tanesi, A1B eğrisi boyunca irileşmeye başlayacaktır. B noktasında, bir kez daha plastik bir şekil değişimi eklendiği takdirde, kristal yapısı B1B boyunca yeniden inceler. Her pasoda veya her şekil değiştirme sırasında kristal

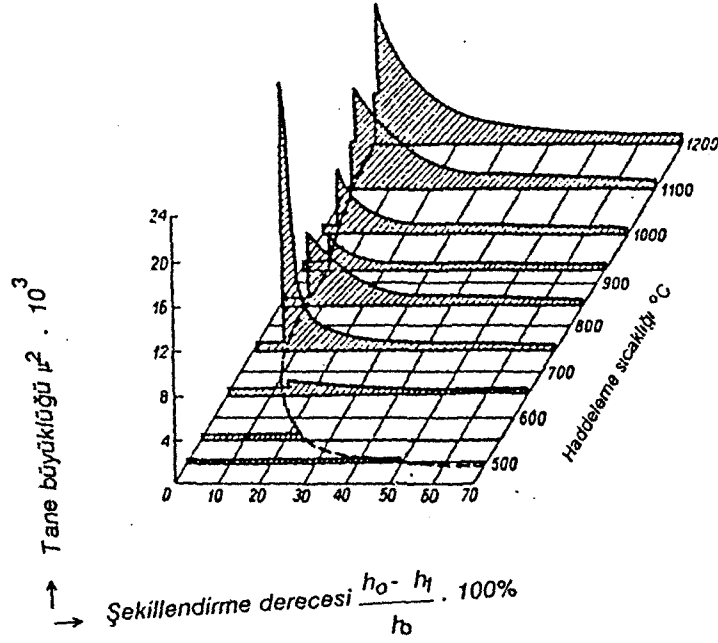
taneleri inceleyecektir. Bu kristal taneleri, bağımsız pasolar arasında çoğalma için gerekli olan süreye sahiptirler. Son şekil değişiminden sonra son olarak E noktasına tekabül eden tane büyüklüğü elde edilir.



Şekil 2.16 Plastik sıcak bir şekil verme işleminin yumuşak bir çelikte tane büyüklüğüne etkisi.

Şekillendirme safhasında nihai sıcaklık ne kadar yüksek olursa, şekillendirilen malzemedeki tane büyüklüğüde o nispette büyük olur. Sıcak şekillendirme işleminin şekil 2.16'da görülen O noktasında sona ermesi temin edildiği taktirde çok ince taneli bir yapı elde edilir.

Yeniden kristalleşme safhası; çeliğin oda sıcaklığında işlenmesi, nihai şekillendirme sıcaklığı altında bulunması halinde önem kazanmaktadır. Bu arada devam eden safhaları açıklamak üzere çeşitli şekillendirme dereceleri ile farklı sıcaklıklarda 30x30 mm ebatlarında kare kesitli çelik deney parçaları haddelenmiştir. Malzemede kimyasal terkip % 0.03 C, % 0.03 Si, % 0.08 Mn, % 0.01 P ve % 0.012 S idi. Şekil değiştirme derecesi olarak haddelenen deney parçalarında ortaya çıkan düşüş esas alınmıştır. Haddelenmeden sonra deney parçaları beş dakika süre ile fırında tavllanmış ve bunu mütekip yavaş yavaş kumda soğutulmuştur. Deney sonuçları şekil 2.17'de gösterilen diyagramda toplanmıştır. Bu diyagramda tane büyüklüğünün belirli ve ortalama şekil değiştirme derecelerinde dahi önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Bununla beraber sıcaklığın tane büyüklüğüne etkisi bu arada pek önemli değildir. Diyagramdan daha sonra sıcak şekillendirme sırasında kritik bir sıcaklığın mevcut olduğu sonucu çıkmaktadır. Bu kritik sıcaklıkta, sabit şekil değiştirme derecesinde, malzeme yapısında çok yoğun bir biçimde tane büyümesi meydana gelmektedir.



Şekil 2.17 Sıcak haddelenmiş yumuşak bir çelikte yeniden kristalleşen yapı ile şekil değiştirme ve haddelenme sıcaklığı arasındaki ilişki. (Wusatowski, 1963)

Diyagram son pasoda söz konusu olan şekil değiştirme koşulları ile bu arada tespit edilen yapı esas alınmak suretiyle çizilmiştir. Bununla beraber nihai durumda ortaya çıkan bu tane büyüklüğünün, bir önce yapılan sıcak şekillendirme koşullarına belli bir ölçüde bağlı olduğu ispatlanmıştır.

Çok çeşitli çelik türlerine ilişkin bu tür üç boyutlu, hacimsel diyagramların pratik değeri çok büyüktür. En uygun malzeme özelliklerini elde etmek üzere, son pasoda belirli bir şekil değiştirme sırasında nihai haddelenme sıcaklığının hangi düzeyde olması gerektiği bu diyagramlarda çıkarılabilir. Şekil 2.17'de gösterilen koşullara göre, 700°C'nin altındaki haddelenme sıcaklıklarında tane büyüklüğünün şekil değiştirme ile hemen hemen hiç ilgisi olmadığı ortaya çıkmaktadır. 750°C ile 850°C arasında olan yüksek sıcaklıklarda, kritik bölgeden sakınmak maksadıyla son pasodaki düşüş nispeti % 10'dan daha küçük veya % 25'den daha büyük seçilmelidir. Normal kesit düşüşlerinde ince taneli bir yapı elde etmek bakımından son pasolamada nihai haddelenme sıcaklığı 900°C ile 1000°C arasında olmalıdır.

Yapılan çok çeşitli araştırmalar sonunda yeniden kristalleşme safhası ister doğrudan şekil değiştirme sırasında, ister daha sonra uygun olan yeniden kristalleşme sıcaklığında yapılsın, rekristalizasyon olayının bu duruma hiç bağlı olmadan aynı koşullar altında aynı nihai neticeyi verdiği tesbit edilmiştir. Bu arada eğer malzeme yapısı dikkate alınırsa sıcak ve soğuk şekillendirme arasında katıyen belli bir sınır olmadığı göz önüne alınmalıdır. Bununla beraber metal malzemenin az veya çok belirli bir yapı karakteri arz ettiği bir çok geçiş durumları vardır.

Örneğin; çok yüksek sıcaklıklarda çelik haddelendiği taktirde haddelenmiş malzemede elbette plastik olarak şekillendirilen tane büyüklüklerine artık rastlanmayacaktır. Çünkü bu sıcaklık bölgesinde malzeme çok çabuk rekristalize olmakta ve bu arada şekillendirme ile ilgili tüm değişimler ortadan kalkmaktadır. Bu arada mevcut haddeleme koşullarına göre büyüklükleri farklı poligon kesitli kristal taneleri elde edilir. Buna karşın ortalama sıcaklık bölgesinde haddeleme yapıldığı taktirde, malzeme daha yavaş rekristalize olmakta ve yeniden kristalleşme olayı da daha uzun zaman almaktadır. Bu tür haddeleme koşullarında eksiksiz bir rekristalizasyon için gereken sürenin, haddelenen malzemenin haddeleme aralığında geçtiği süreden daha uzun olduğu görülebilir. Bu durumda haddeleri terk ettikten sonrada haddelenen malzemede rekristalizasyon safhaları devam etmektedir. Çünkü haddelenen malzemede sıcaklık henüz yeter derecede yüksektir ve bu sıcaklık ancak yavaş yavaş azalmaktadır. Buna rağmen malzeme tamamen rekristalize olmakta ve malzeme yapısında da artık hiç bir suretle kalıcı bir şekil değişikliği izleri görülmemektedir. Çeşitli mukavemet özellikleri önemli ölçüde sıcaklığa bağlıdır. Bu arada çelikte plastikleşme kabiliyeti, daha yüksek sıcaklıklarda soğuk bir şekillendirmeye kıyasla oldukça fazladır; yani artan sıcaklıkla birlikte çelikte şekil değiştirme mukavemeti önemli ölçüde düşmektedir. (Wusatowski, 1963)

Sıcaklığın, çeliğin plastikleşme kabiliyetine olan etkisini daha ayrıntılı bir şekilde inceleyebilmek için ilk önce dış kuvvetler etkisi altında kalıcı olarak şekil değiştiren, bu arada parçalanmadan daha doğrusu malzeme parçacıkları arasındaki bağ kaybolmadan plastik olarak şekillendirilen bir malzemenin sahip olduğu özelliğin bu plastikleşme kabiliyetine bir ölçü teşkil etmesi gerektiği tesbit edilmelidir. Metal bir malzemede plastikleşme kabiliyeti ne kadar büyük olursa, bu malzeme kırılmadan o nispette fazla şekillendirilebilmektedir. Düşük sıcaklıklarda , örneğin  $-40^{\circ}\text{C}$  ile  $60^{\circ}\text{C}$  arasında çok sayıdaki çelik türünde plastikleşme kabiliyetini önemli ölçüde düşüren soğuk bir gevrekleşme hali ortaya çıkmaktadır.  $250^{\circ}\text{C}$  ile  $350^{\circ}\text{C}$  arasında mavi kırılmalık denilen diğer bir kırılmalık bölgesi ortaya çıkmaktadır. Bu bölgenin ötesinde çeliğin ısıtılması halinde çelikte plastikleşme kabiliyeti kritik sıcaklığa kadar artmaktadır. Kritik sıcaklıkta bir çok çelik türünde içteki şekil değiştirmeler nedeniyle ortaya çıkan yeni fazlar sonunda plastikleşme kabiliyeti tekrar azalmaktadır.  $900^{\circ}\text{C}$  ile  $1200^{\circ}\text{C}$  arasında olan sıcak şekillendirme bölgesinde çelikler en fazla plastikleşme kabiliyetine sahiptir. Yumuşamanın başladığı sıcaklık bölgesinin yakınına kadar çelik ısıtıldığı taktirde bu bölgede ortaya çıkan yanma ve aşırı tavlama olayları karşısında plastikleşme kabiliyeti tekrar azalmaktadır.

Sıcak şekillendirme yönteminde şekil değiştirme koşullarının belirlenmesi ve şekillendirmede harcanan kuvvetlerin hesaplanabilmesi açısından, metal bir malzemede plastikleşme kabiliyeti ile sıcaklık arasındaki ilişkiyi tesbit etmek büyük önem taşımaktadır.

Yüksek sıcaklıklarda kimyasal aktivite çoğalır. Havadaki oksijen ile metal malzemenin reaksiyona girmesi tehlikesi artar. Bu arada sadece demir değil özellikle diğer bütün metaller ve alaşım elemanları okside olur. Solidus sıcaklığı üstüne kadar çelik ısıtıldığı takdirde tane sınırı kütlesi erimeye başlar. Oksijen, malzeme içerisine derin bir şekilde nüfuz ederek kristal tanelerinde yüzeyi okside eder. Böylece bağımsız kristaller arasındaki bağlantıya doğrudan zarar verildiği ve malzeme yapısının tahrip edildiği gayet açıktır. Aşırı tavlama suretiyle malzemede meydana gelen bu tahribata karşın yanma olayı tamamen kimyasal bir olaydır. Yanma olayı sonunda malzeme tamamen kullanılmaz duruma gelmektedir. Bu durumda malzeme sadece erilmek suretiyle tekrar kullanılabilir bir hale getirilebilir. (Yurci, 1992)



### 3 PLASTİK ŞEKİLLENDİRME ESASLARI

#### 3.1. PLASTİK ŞEKİLLENDİRMEDE HACİM SABİTLİĞİ KANUNU

Oksidasyon nedeniyle malzeme yüzeyinde meydana gelen çok küçük malzeme kayıpları ile sıcak şekillendirmede tufal teşekkülü göz önüne alınmaz ve bloklar haddelenirken ilk pasalarda bloklar içerisinde gaz boşluklarının kaynaklanması ile ortaya çıkan önemsiz hacim değişimleri ihmal edilirse, tüm plastik şekil değiştirme olayında malzeme hacminin değişmediği, sabit kaldığı görülmektedir.

Sıcak şekillendirmede malzeme yoğunluğu sadece gaz boşluklarının kaynaklanması suretiyle değil, bilakis metal malzemede meydana gelen allotrop değişimler nedeniyle de değişikliğe uğramaktadır. Aynı şekilde soğutma esnasında sıcaklık değişmesi nedeniyle plastik olarak şekillendirilen metal malzemede büzülme meydana geldiği de ayrıca göz önüne alınmalıdır. (Çapan, 1977)

#### 3.2 ŞEKİL DEĞİŞTİRME MUKAVEMETİ

Şekil değiştirme mukavemeti metalde akma sınırında ortaya çıkan akma gerilmesini ifade etmektedir. Akma gerilmesine etki eden en önemli faktörler sıcaklık ve şekil değiştirme hızıdır. Bununla beraber sıcak ve soğuk şekillendirmede bu etkenlerin tesiri farklıdır. Metal malzemeler soğuk olarak şekillendirilirken bir pekleşme hali ortaya çıkmaktadır. Bu pekleşme sonunda artan şekil değişimiyle birlikte akma gerilmesi artmaktadır. Bu arada, şekil değişiminin artmasıyla birlikte dayanıklılaşma hali gitgide azalmaktadır. Sıcak şekillendirme esnasında pekleşme ve yeniden kristalleşme hali aynı zamanda devam etmektedir. Bu nedenle, malzemede bir pekleşme hali ortaya çıkmamaktadır. Şekillendirme süresince sıcaklığın sabit kaldığı var sayılırsa akma gerilmesinin değişmediği kabul edilebilir.

Şekil değiştirme hızının metalsel malzemelerdeki etkisi ile ilgili olarak dört ayrı sıcaklık bölgesinin tanımlanması gerekmektedir.

##### a) En düşük sıcaklık bölgesi :

Düşük hızlarda iyi bir şekilde plastikleşebilen metalsel bir malzeme, yüksek şekil değiştirme hızlarında kırılğan bir hal alabilir.

##### b) Normal şekil değiştirme bölgesi :

Şekil değiştirme hızının doğrudan etkisi vardır. Buna karşın hız açısından mekaniksel etkenler söz konusu olabilir.

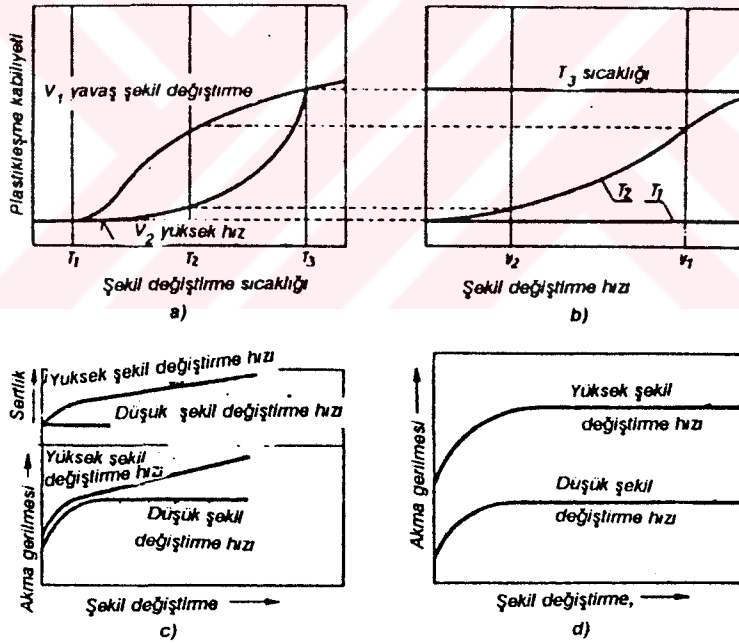
##### c) Yüksek sıcaklık bölgesi :

Düşük hızlarda şekillendirme safhasının tamamen sıcak şekillendirme bölgesinde gerçekleşmesine karşın , yüksek şekillendirme hızlarında bir pekleşme hali kendini hissettirmektedir.

d) Normal sıcak şekillendirme bölgesi :

Sıcak şekillendirme sırasında şekil değiştirme hızının etkisi büyüktür. Düşük sıcak şekillendirme bölgesinde, yüksek şekil değiştirme hızlarında malzeme kırılgan bir hal alabilir.

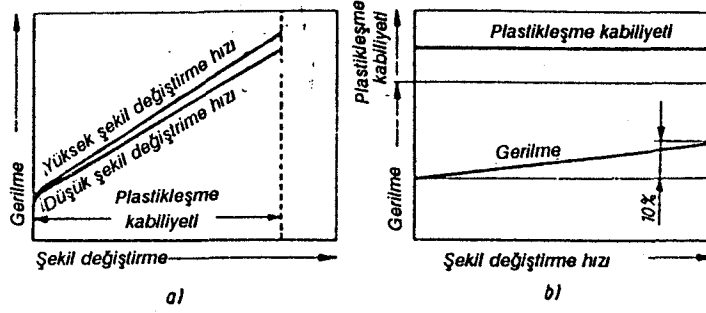
Şekil 3.18'de görüleceği üzere bir çok metaller düşük sıcaklıklarda, dar bölgeler içerisinde yüksek şekil değiştirme hızlarında kırılgan; buna mukabil düşük hızlarda plastikleşen bir durum almaktadır. Bu etki örneğin ; T2 sıcaklığında gerçekte sadece bağımsız bazı hallerde kendini göstermektedir. Plastikleşen bir durumdan kırılgan bir duruma geçiş; demir , çinko ve magnezyum gibi bazı metallerde tesbit edilmiştir. Bu geçiş durumuda dönüşme sıcaklıklarında (T3 sıcaklıkları) ortaya çıkmaktadır. Bu tür hallerde plastik şekillendirme esnasında işletme sıcaklığı biraz daha yüksek tutulmalı veya düşük şekil değiştirme hızları uygulanmalıdır.



Şekil 3.18 Çeşitli şekil değiştirme sıcaklıklarında plastikleşme kabiliyeti ile şekil değiştirme mukavemeti üzerinde şekil değiştirme hızının etkisi.

Soğuk şekillendirmede şekil değişme hızının etkisi düşüktür. (Şekil 3.19 a ve 3.19 b) Bu etki metal malzemede sadece şekil değiştirme mukavemetinin önemsiz bir şekilde yükselmesi

şeklinde ortaya çıkmaktadır. Gerilmedeki yükselmelerin düşük olması nedeniyle plastikleşme kabiliyeti şekil değiştirme hızıyla pratik olarak etkilenmemektedir.



Şekil 3.19 Plastik olarak soğuk şekil değiştirme esnasında şekil değiştirme mukavemeti ile plastikleşme kabiliyeti üzerinde şekil değiştirme hızının etkisi.

Sıcak ve soğuk şekillendirme arasındaki sıcaklık bölgesinde şekil değiştirme hızının etkisi daha kuvvetli bir şekilde kendini göstermektedir. (Şekil 3.18 c) Malzeme yüksek şekil değiştirme hızlarında aynen soğuk şekillendirmedeki hali almaktadır. Bir pekleşme durumu ortaya çıkmaktadır. Bununla beraber düşük şekil değiştirme hızıyla malzemeye şekil verildiği takdirde, malzeme aynen sıcak şekillendirmedeki hali almakta, iyi bir şekilde plastikleşmekte ve hemen hemen hiç pekleşmemektedir. (Gerilme yükselmesi meydana gelmemektedir.) Şekil değiştirme hızı ne kadar yüksek olursa, plastik şekillendirme esnasında sıcak şekillendirme bölgesinde bulunan en alt sıcaklık sınırında o nispette yüksek olmaktadır. Metal malzemelerin işlenmesinde her ne kadar bu bölgeden doğrudan doğruya faydalanılmıyorsa da limit sıcaklıklarda malzeme dizaynında sünme dayanımı açısından bu bölgenin pratikte ifade ettiği anlam çok büyüktür.

Normal sıcak şekillendirme bölgesinde şekil değiştirme hızının oldukça önemli bir etkisi vardır. Bu etki genellikle şekil değiştirme mukavemetinin değişmesi şeklinde kendini göstermektedir. (Şekil 3.18 d) Şekillendirme oranı iki katına çıkarıldığı takdirde, gerilmeler yaklaşık % 10-%20 arasında artmaktadır.

Çok yüksek sıcaklıklarda şekil değiştirme hızlarında ısının nakledilmesi için gereken süre çok kısa olduğundan malzemedeki sıcaklık yükselmektedir. Bu durumda yüksek şekil değiştirme hızlarında söz konusu metal malzemede ergime noktasının yakınına gelinebileceği sonucuna varılmaktadır. Sıcak şekillendirme bölgesi için gerekli olan sıcaklık bölgesi öyle

sınırlandırılır ki dövme veya haddeleme esnasında genellikle düşük şekil değiştirme hızlarıyla çalışmak zorunlu bir hal almaktadır. (Wusatowski, 1963)

Metal bir malzemenin plastik olarak şekillendirilmesinde karar vermeyi etkileyen en önemli faktör şekil değiştirme mukavemetidir. Bu mukavemet şekillendirme anındaki malzeme durumu ile ilgilidir.

Şöyle ki;

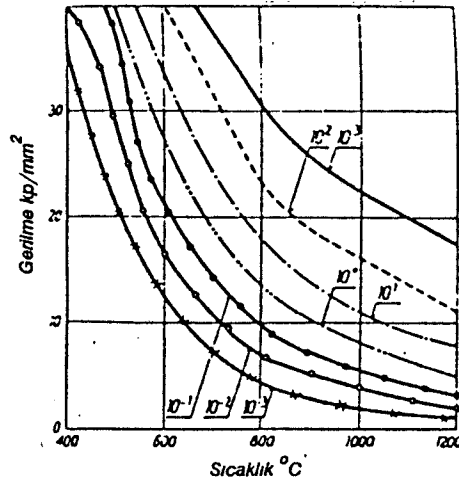
A - Yeniden kristalleşme için gereken koşulların altında bulunan şekillendirme safhalarında:

- Malzeme türüne
- Şekillendirme derecesine veya malzemedeki ön şekil değişimine
- Az bir ölçüde şekil değiştirme hızına

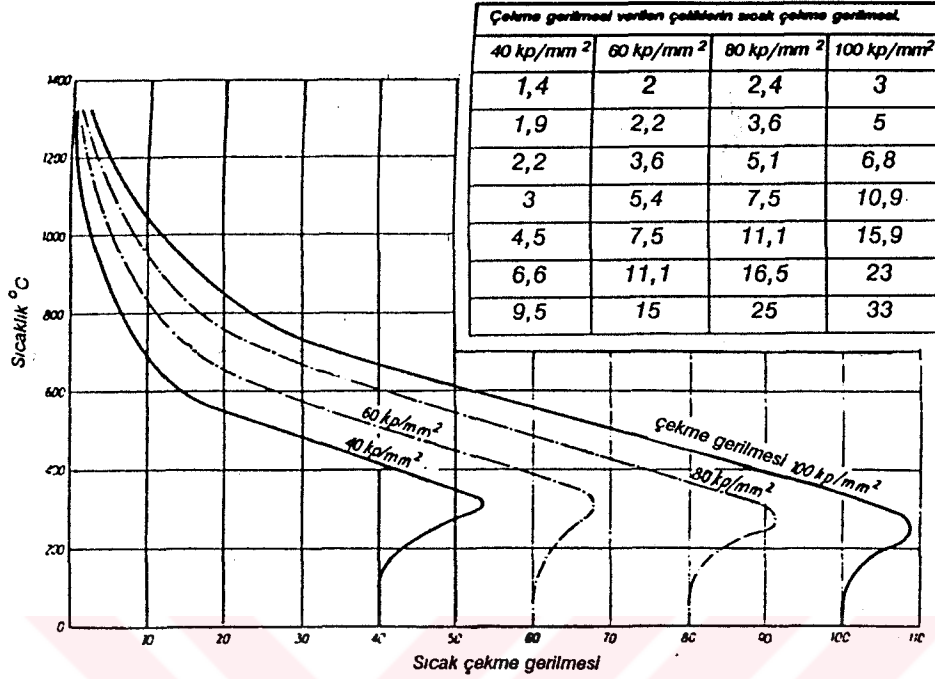
B - Yeniden kristalleşme için gereken koşulların üstünde bulunan şekillendirme safhasında:

- Malzeme türüne
- Şekil değiştirme hızına
- Sıcaklığa

Şekil değiştirme hızının şekil değiştirme mukavemetine etkisi, yeniden kristalleşme sıcaklığı üstünde (Sıcak şekillendirme) çok büyüktür. Eğer şekillendirme sıcaklığı fark edilemeyecek bir şekilde yeniden kristalleşme sıcaklığı üstünde bulunur ve rekristalizasyon hızı bundan dolayı genellikle çok düşük olursa, ilk yapı tamamen değişmez. Bu durum şekil değiştirme sonunda soğuk şekillendirmede olduğu gibi malzemede kısmi bir dayanıklılaşma meydana gelmesine neden olmaktadır. Haddehanede normal şekil değiştirme hızları ile ilgili bölgeler saniyenin  $10^0$ - $10^3$  birimleri arasında bulunmaktadır. (Burtsev, 1973)



Şekil 3.20 Şekil değiştirme hızına bağlı olarak çeşitli sıcaklıklarda yumuşak bir çelikte şekil değiştirme mukavemeti. (Wusatowski, 1963)



Şekil 3.21 Çekme mukavemetleri farklı olan karbon çeliklerinde sıcaklığa bağlı olarak şekil değiştirme mukavemeti. (Wusatowski, 1963)

### 3.3 METALSEL MALZEMELERDE ŞEKİL DEĞİŞTİRME DİRENCİ

Katı cisimler birbiri üzerinde kayarsa; bağlı bir kaymada, kayan yüzeylerde sürtünme kuvvetlerinin her zaman yenilmek zorunda olduğu bir sürtünme meydana gelir. Bir cisim sürekli olarak P bileşke kuvveti ile (Şekil 3.22 a) düzgün bir yüzeye bastırılırsa, cisimle mesnet yüzeyi arasında ortaya çıkan sürtünme direncini yenmek ve mesnete karşı cisimde bir kayma temin etmek üzere  $R=f.P$  ile ifade edilen bir kuvvetin uygulanması gerekmektedir. Bu formülde görülen  $f$  sürtünme katsayısı olarak nitelendirilir.

Sürtünme katsayısı şimdiye kadar bilindiği gibi değişmeyen bir büyüklük değildir. Bu katsayı sadece birbiri üzerinde kayan yüzeylerin malzemesine değil, bilakis diğer etkenlere bağlı olan bir büyüklüktür. Sürtünen yüzeylerin kuru oluşu veya bu yüzeylerin iyi bir şekilde yağlanması prensipte büyük bir anlam taşımaktadır. Kuru sürtünmede P kuvveti büyürse, sürtünme katsayısı sukünet halindeki sürtünme katsayısı denilen ve  $f_0$  ile ifade edilen en yüksek bir değere çıkmaktadır. Buna mukabil eğer bu yüzeyler iyi yağlanıyorsa, sürtünen yüzeylerde relatif hızın artması ile birlikte  $f$  sürtünme katsayısı azalır. Sukünet halinde ki  $f_0$  katsayısı bu



Çeşitli metallere alaşımların plastik olarak şekillendirilmesi esnasında ortaya çıkan sürtünme kat sayılarının pratik amaçlar için kullanılmasını teminen GUBKIN tarafından yukarıda verilen 3.23 nolu tablo hazırlanmıştır.

Sürtünme kuvveti, daha doğrusu sürtünme direnci büyüklüğü iş parçası ile takım yüzeyi arasında etkili olan P kuvveti ile sürtünme katsayısına bağlıdır. Temas yüzeyleri ne kadar pürüzlü ve düzgün değilse f sürtünme katsayısı o nispette büyüktür.

Şekil değiştirme türünün yapışma bölgesi büyüklüğü üzerinde etkili olduğu sonucuna varılır. Söz konusu koşullara göre şekil değiştirme türü bu yapışma bölgesini büyütebilir veya küçülebilir.

Şekil değiştirme safhasında malzeme yüzeyini paralel yönde etkileyen kayma kuvvetlerinin akma gerilmesini aşması halinde, yüzeye etki eden  $f_0$  sürtünme direnci ile sürtünme katsayısında ortaya çıkan artışlar pek önemli değildir. Çünkü akma gerilmesinden daha büyük bir kuvvetin malzeme tarafından karşılanması olası değildir. (Wusatowski, 1963)

Takım ile malzeme arasında temas yüzeyinde yapışma bölgesinin başladığı yerde, f sürtünme katsayısı teorik olarak sabittir. Bu bölge için ayrıca sürtünme katsayısının hesaplanması gerekmez. Bununla beraber hareket halindeki sürtünmenin meydana geldiği sürtünme katsayısının aldığı değer bilinmesi büyük bir önem taşımaktadır. Bu değeri hesaplamak amacıyla çeşitli deneyler yapılmıştır. Bu deneyler sonunda sürtünme katsayısının; temas eden malzemelerin karakteriyle, bu malzemelerin yüzey durumlarıyla, sıcaklıkta özgül basınçla ve relatif hızla ilişkisi olduğu sonucuna varılmıştır.

Bunun yanısıra mutlaka gözönüne alınması gereken başka etkenlerde önemlidir. Sıcak şekillendirmede tufal teşekkülü, takım ve malzeme yüzeyinde meydana gelen su veya buhar tabakaları ve merdane yüzeyinde görülen değişiklikler bu etkenlere dahildir.

Deformasyona karşı direnç; etkisi altında çalışılan metalin, elastikten plastik deformasyona geçtiği maksimum gerilmedir. Deformasyona karşı direnç; sıcaklık, yorulma sertleştirilmesi, metalin doğal rijitliği ve deformasyon oranına bağlıdır. Deformasyona karşı direnç ve minimum ana gerilme deforme edilen cismin kalınlığının artmasıyla azalır. Bir şeridin kalınlığında önemli bir artış olduğu takdirde, temas yüzeyinin deforme edilen cismin hacmine oranı ve temas sürtünmesinin etkisi küçülür. (Gerilmenin lineer hali) Soğuk ve sıcak metal işleme yöntemlerinin her ikisinde de deformasyona karşı direnç sıcaklıktaki artmayla azalır ve deformasyon oranının artmasıyla artar. (Burtsev, 1973)

## 4 HADDELEME SAFHASINDA TEMEL ESASLAR

### 4.1 HADDELEMEDE MALZEME AKIŞI

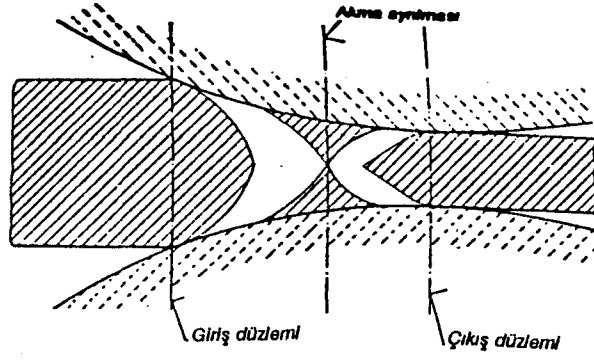
Kayma sürtünmesinin tüm haddeleme aralığı içerisinde hüküm sürdüğü kabul edilirse şekil değiştirme safhası yaklaşık olarak paralel epipedik şeklindeki bir yığılma safhasına göre oluşacaktır.

Sürtünme etkisi metal yüzeyinde ne kadar büyükse, malzeme akışında o ölçüde bozulmakta ve malzeme merdane yüzeyine karşı koymaya zorlanmaktadır.

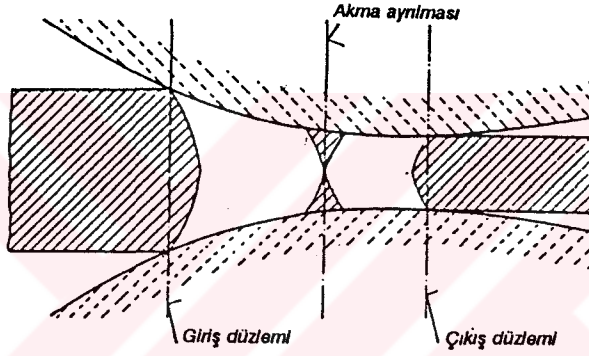
Başlangıçta düzgün olan kesit alanlarını haddeleme süresince eğmektedir. Bu arada eğrilikte ortaya çıkan çukur taraf, haddeleme yönünde bulunmaktadır. Hadde ile haddelenen malzeme arasında temas yayı bölgesinde bağımsız plastilin tabakaları arasındaki uzaklık değişmediğinden, burada hadde yüzeyinde sadece çok az bir miktarda bir kayma hareketi meydana gelebilir. Plastilin tabakalarında meydana gelen şekil değişmesinden, haddelemedeki şekil değişiminin giriş düzleminde haddelenen malzeme yüzeyinde başladığı ve buradan içeriye doğru gittikçe ilerlediği ve en sonunda hadde çubuğu özünü de kapsadığı sonucu çıkmaktadır.

Haddeleme aralığında şekil değişiminde ortaya çıkan bu durum giriş düzleminde bulunan bölge içinde çok az bir plastik şekillenmeye uğrayan kısımların oluşmasına neden olmaktadır. Akma ayrılması civarında ortaya çıkan şekillendirme bölgesinin yaptığı etki, haddeleme aralığında sağa ve sola doğru oldukça uzak bir şekilde uzanmaktadır. (Şekil 4.24) Buna mukabil şekil 4.25'de malzeme akışının engellendiği bölge akma ayrılmasında oldukça dardır ve dolayısıyla giriş ve çıkış sırasında akmanın engellendiği bölgelerin o kadar geniş bir şekilde oluşmadığı bir haddeleme safhası gösterilmektedir.

Hadde yolu düzgün ve iyi yağlanan haddelerle yapılan soğuk haddelemede, yapışma bölgesi tahmin edileceği gibi oldukça dardır ve haddelenen malzeme hemen hemen tüm temas yüzeyi boyunca hadde yüzeyinde kaymaktadır. (Şekil 4.25) Bu husus ise paralel epipedik şekil değişiminden oldukça ayrılan sapmalara neden olmaktadır. Malzeme yüzeyinde eğer sürtünme kuvveti meydana gelmediyse, hemen hemen paralel epipedik bir şekil değiştirme olacak ve bunun sonucu olarak da tüm kenarlar düzgün, paralel ve birbirine düşey bir konumda bulunacaktır. Sürtünme ne kadar yüksek olursa hadde çubuğu da o nispette kuvvetli olarak şekil değiştirmektedir. Bu arada daha önce yığılma safhasında olduğu gibi özellikle yan yüzeyler fiçi şeklinde yığılmaktadır. (Wusatowski, 1963)

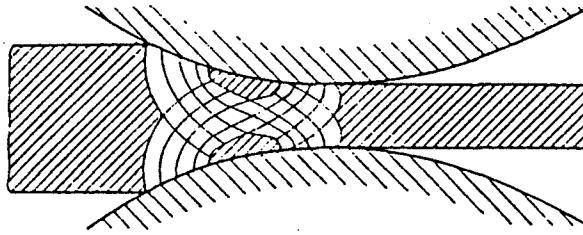


Şekil 4.24 Haddelenme aralığında malzeme akışının engellendiği bölgelerin şematik olarak gösterilmesi. Engellenen şekil değiştirme bölgeleri taranmıştır.



Şekil 4.25 Şekil 4.24'de olduğu gibi haddelenme aralığında malzeme akışının engellendiği bölgeler. Bununla birlikte akma ayrılmasında engellenen şekil değiştirme, daha küçük bölgelidir.

Soğuk haddelenme aralığında meydana gelen gerçek koşullar şekil 4.26'da gösterilmiştir.



Şekil 4.26 Düşük sürtünme katsayılı soğuk haddelenme esnasında haddelenme aralığında akmanın engellendiği gölgeler.

Taranan yüzeyler hadde ile malzeme arasında etkili olan sürtünme kuvvetleri sonunda meydana gelen ve şekil değiştirmenin engellendiği bölgeleri göstermektedir.

#### 4.2 İLK DEFORMASYON KARAKTERİ İLE ERGİTME ve DÖKÜM KOŞULLARININ HADDELENEBİLME KABİLİYETİNE ETKİLERİ

Malzemelerin kalitesi ile başlayan ve ingot oluşum koşullarına kadar uzanan bir çok şekil değiştirme faktörleri metalin haddelenebilme kabiliyetini etkilerler. Bu faktörler arasında metalin yoğunluğu, üretim metodu, hammaddenin saflığı, ısıtma esnasında homojenleştirme veya özel homojenleştirme işlemleri vardır. Metal olmayan kalıntıların miktarı ve boyutları eritme, deoksidasyon ve döküm koşulları ile belirlenir. Özel işleme türleride (Sentetik cüruf, vakumla gaz boşaltma) metal olmayan kalıntıların oluşumunu etkilerler. Bir metalin yapısı ve özelliklerinin heterojenliği onun plastik işlenme koşullarını etkilerler. Bu nedenle döküm metalin ön işlenmesi, hadde ile metal üretiminin çok önemli bir parçasıdır. Kural olarak, ön deformasyon yapılmış bir metalin plastik özellikleri döküm metalinkilerden daha iyidir. (Burtsev, 1973)

#### 4.3 MAKRO YAPI ve MİKRO YAPININ HADDELENEBİLME KABİLİYETİNE ETKİLERİ

Bir metalin numunelerinin çıplak gözle oyuk yüzeylerinde görülebilen yapısı (Makro yapı) metal kristalleşmesi hakkında bir fikir verir. İngotların katılaştırılması esnasında kristalleşmede şu üç bölge gözlemlenir.

- a) Rastgele yönelmiş küçük kristallerden oluşan dış kabuk bölgesi
- b) İngot yüzeylerine dik konumlardaki sütun biçimli kristaller bölgesi
- c) Rastgele yönelmiş farklı boyuttaki kristallerin oluşturduğu iç bölge

Belirli koşullar altında bazı çelik ve alaşımlar yukarıda tanımlandığından farklı bir yönde kristalleşirler. Bazı kristal bölgeleri hiç olmayabilir ve ingot sütun biçimli veya kristal ötesi bir yapıya sahip olabilir. İngot'un döküm ve soğutma koşullarına bağlı olarak, aynı tür çelikler farklı biçimde kristalleşebilirler. Kristalleşme aynı zamanda alaşım elementlerinden de etkilenir. Kristal ötesi ve kaba taneli yapıların sıcak haddeleme koşullarında, çeliğin plastik özelliklerini her zaman kötüleştirmediği bilinmektedir. Kristal ötesi ve kaba taneli yapıya sahip ingotların haddelenmesinde bir çok durumda daha az kötüleşme görülür. Kristal ötesi yapıya sahip ingotlar tercihen haddelenmeden önce dövülürler. Çünkü iyi bir çekme ile bile, dövülmüş metal yapısı tamamen bertaraf edilir ve haddelenmiş metal homojen bir yapıya sahip olmaz.

Mikro yapının haddelenebilme kabiliyetine etkisi, her zaman daha önce gözönünde bulundurulmuştur. Sıcak şekil değiştirme sıcaklıklarında aşırı fazlara sahip olmayan homojen katı çözeltili biçimindeki bir metal, iyi haddelenebilme kabiliyetine sahip diye karakterize edilir. Aşırı fazlar plastik özellikler üzerinde ters etkiye sahiptirler. Isıtma esnasında aşırı fazların çözülmesi olasılığı gözönüne alınmalıdır. Çeliğin katı çözeltili oluşturması için gerekli gerilme faz içeriğine bağlıdır. (Burtsev, 1973)

#### 4.4 SICAK HADDELEMEDE GENİŞLEME, UZAMA ve İNCELME ARASINDAKİ İLİŞKİLER

Geniş bandlarla levhaların sıcak olarak haddelenmesinde genişleme nispeti düşüktür. Silindirik haddeler arasında haddelenen malzeme şekil değiştirirken, haddeleme yönünde meydana gelen sürtünme direncinin düşey yöndeki dirence kıyasla daha düşük olması ve dolayısıyla haddeleme yönünde malzeme akışının kolaylaşması nedeni ile genişlemenin küçük oluşu doğaldır.

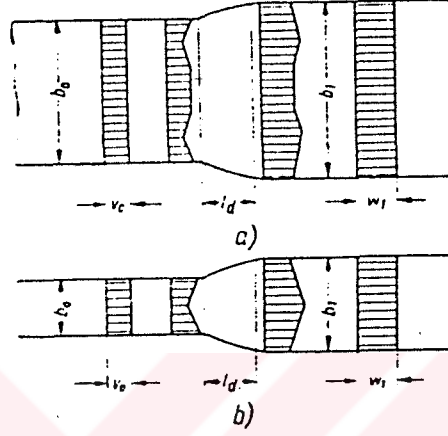
4.27 ve 4.28 nolu şekillerde dar ve geniş yassı kesitlerin haddelenmesinde meydana gelen koşullar şematik olarak gösterilmiştir. Basılan yüzeyler şekil 4.28'de taranmıştır. Hadde çubuğunda 4 ile belirtilen noktalar arasında kalan kısım incelendiğinde; bu kısmın 11 ve 9'la gösterilen kısımlara kıyasla, 10 ile belirtilen kısım yönünde daha kolay kaydığı görülmektedir. Çünkü haddeleme yönünde, malzeme yüzeyi ile merdane arasında meydana gelen sürtünme kuvvetleri oldukça düşüktür. Bu husus hiç şüphesiz 3 ve 5 ile gösterilen noktaların yakınında bulunan hadde çubuğu kısımları için de, daha küçük ölçüde olmak üzere geçerlidir. 2 ve 7 noktaları yakınında olmak üzere, 10 yönünde ortaya çıkan sürtünme direnci aşağı yukarı 9 ve 11 yönündeki sürtünme direncine eşittir. Böylece malzeme, hadde çubuğunun orta kısmı olan ve kendini haddeleme yönünde akmaya zorlayan 3,4,5 kısımları ile rijit bir şekilde bağlı olmamış olsaydı bu kısımda hiçbir engele uğramadan yan taraftan akabilecekti.

Hadde çubuğunda yan tarafta sınırlayıcı yüzeylerin yakınında bulunan malzeme bölgeleri, haddelerin doğrudan baskısı sonunda boyuna istikamette fazla miktarda uzatılmakta ve bu bölgeler hadde çubuğunda, orta kısım tarafından sürüklenmektedir.

Kenar bölgeleri aynı zamanda hadde çubuğunda orta kısmın genişletilmesini engellemekte ve dolayısıyla bu kısmın uzatılmasına destek olmaktadır. Bu arada kenar bölgeleri orta kısım tarafından sürüklenmekte ve böylece bu bölgelerin yana doğru ayrılmaları engellenmektedir. Çeşitli kesitlerinde bulunan kısımların yaptığı bu karşılıklı etki sonunda, başlangıçta 1-6 ile ifade edilen doğru çizgisi pasolama sonunda 8-12 eğrisine dönüşmektedir.

Enlemesine istikamette meydana gelen sürtünme direncinin haddeme yönünde etkili olan akma direncinden daha büyük olmaması sebebiyle, kare çubuklar haddelenirken daha büyük bir genişleme ortaya çıkabilir.

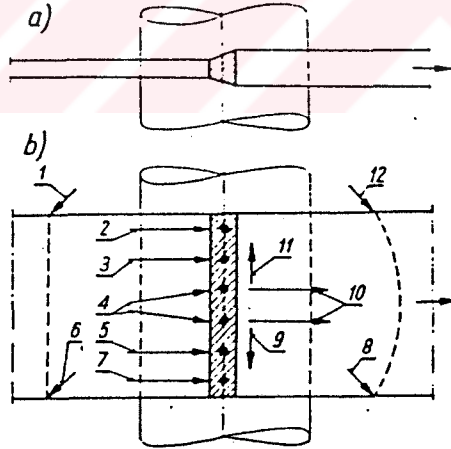
Eğer haddeme yönünde basılan yüzey oldukça kısa ve de düşey yönde olmak üzere geniş olursa genişleme küçüktür.



Şekil 4.27 Geniş ve dar yassı kesitlerin haddelenmesinde akış hızı dağılımı

a) Yassı kesit,

b) Kare kesit



Şekil 4.28- Basılan yüzeydeki izdüşüm

a) Dar hadde çubuğu,

b) Geniş hadde çubuğu

Haddelerin yaptığı basınç sonunda haddelenen malzemede meydana gelen her yükseklik düşüşü, malzemenin haddeme yönünde boyuna doğru akmasına ve buna dikey olarak da enine istikamette genişlemesine neden olmaktadır. Uzama ile genişleme arasındaki oranı tayin eden

etkenler arasında; yükseklik düşüşü, basınçtaki kesit şekli, hadde çapı, haddelenen malzemede kimyasal terkip, haddeleme sıcaklığı ve bundan başka hadde ile haddelenen malzeme arasında meydana gelen sürtünme koşulları ile haddeleme hızı önemlidir. Haddeleme işlemi düz hadde yolunda olmayıp bilakis kalibrede yapılırsa, malzeme akışına ayrıca bir de kalibre şekli ile paso kesiti etki etmektedir.

Kontinü bir haddehanede haddeleme sırasında bağımsız hadde makinalarında hadde çubuklarında ortaya çıkan farklı çıkış hızları nedeniyle peşpeşe gelen iki hadde makinası arasında hadde damarında bir kesiklik meydana gelebilir. Bu durum haddelenen malzemede bilerek çekme gerilmesinin elde edildiği band çekmeli soğuk haddeleme sırasında da görülmektedir.

Haddelemede ortaya çıkan genişleme en önemli iki büyüklüğe; haddelenen malzemedeki ilk kesitle hadde çapına bağlıdır. Daha önceki açıklamalara göre (Tablo 4.29 a ve b) ince yassı bir çubukta pasolamadan önce ve pasolamadan sonra genişlemede çok az bir fark olduğu, buna karşılık kare bir çubuğun oldukça kuvvetli bir şekilde genişlediği sonucu çıkmaktadır. Haddeleme yönünde daha yüksek bir uzama meydana gelecek şekilde aynı hadde numuneleri, küçük çaplı hadde büyük çaplı haddeye oranla benzer şekilde daha az genişleyecektir.

Haddelemede  $l$  uzama derecesi ile  $\beta$  genişleme derecesinin sıkı bir şekilde birbirine bağlı olduğu bilinmektedir. Yükseklik yönünde yer değiştiren malzeme kısmen genişlik ve kısmen de boyuna istikamette akmaktadır. Genişleme meydana gelmediği takdirde haddeleme sırasında tüm malzeme sadece boyuna istikamette akacaktır. Bu durumda  $l = 1/g$  olur. Bu bir limit durum olup bu duruma ulaşılması her kalibreleme işleminde ideal bir durum olarak adlandırılabilir. Haddeleme sırasında haddelenen malzeme uzatılmayıp bilakis sadece genişletilirse bunun tersi olan bir limit durum ortaya çıkar. Böylece yığıma ve genişleme dereceleri arasında  $\beta = 1/g$  ilişkisi meydana gelmektedir.

Her iki limit durum arasında çok sayıda ara durumlar vardır. Bu arada uzama ve genişleme dereceleri  $l$ 'den  $1/g$  'a kadar değerler alabilir.  $l$  uzama derecesi  $l > \beta$  olduğu sürece, haddelenen malzeme haddeleme sırasında uzamaktadır. Bu tür kalibreleme ile haddeleme safhasına hala ekonomik olarak bakılır. Bununla beraber genişleme derecesi  $\beta > l$  olur olmaz, genişleme uzunluğa kıyasla haddeleme esnasında daha fazla artacaktır. Bu durum ise haddeleme safhasında sözü edilen ekonomik olma koşulu ile buna uygun olarak kalibreleme açısından elverişsiz görünmektedir.  $\beta = l$  hali, yani uzama ve genişleme derecelerinin birbirine eşit olduğu haddeleme safhası, bir haddeleme işleminde ekonomik yönden teorik sınır olarak tarif edilmektedir. Bununla beraber en elverişsiz koşullarda, yani  $l < \beta$  halinde de zorunlu olarak haddelemenini yapıldığı (örneğin; tel haddelemesinde çeşitli pasolarda olduğu) pratikte bir çok örnekler bulunmaktadır.

Tablo 4.29 a-Çeliklerde Kimyasal bileşim

Çelik No.	Bileşim (% olarak)						Malzeme katsayısı	
	C	Si	Mn	Ni	Cr	W	$d = \frac{\beta_{gerçek}}{\beta_{hesapl.}}$	Çelik markası
1	0,06	Spuren	0,22	-	-	-	1,00000	Thomas çeliği
2	0,20	0,20	0,50	-	-	-	1,02026	C.25.61
3	0,30	0,25	0,50	-	-	-	1,02338	C.35.61
5	1,04	0,30	0,45	-	-	-	1,00734	Alaşımız takım çeliği
7	1,25	0,20	0,25	-	-	-	1,01454	Yay çeliği
8	0,35	0,50	0,60	-	-	-	1,01636	Sıcak çekme
10	1,00	0,30	1,50	-	-	-	1,01066	Yüksek mangan çeliği
11	0,50	1,70	0,70	-	-	-	1,01410	Yay çeliği
12	0,50	0,40	24,0	-	-	-	0,99741	Aşınmaya dayanıklı
13	1,20	0,35	13,0	-	-	-	1,00887	Mangan çeliği
21	0,06	0,20	0,25	3,50	0,40	-	1,01034	Sementasyon çeliği
24	1,30	0,25	0,30	-	0,50	1,80	1,00902	Alaşımız
27	0,40	1,90	0,60	2,00	0,30	-	1,02719	Takım çeliği

## b-Alaşımız çeliklerde kimyasal bileşim

Çelik türü sembolü	Bileşimler [%]									
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	V	Ti	
TP2.....	0,38	0,60	0,30	0,020	0,018	0,64	1,55	-	-	
PS2.....	0,47	0,73	1,69	0,050	0,026	-	-	-	-	
T55.....	0,56	0,66	0,30	0,021	0,030	-	-	-	-	
KCI2.....	0,11	0,53	0,21	0,015	0,029	11,58	0,39	-	0,26	
KP2.....	0,12	0,53	0,56	0,010	0,020	18,23	8,85	-	0,50	
KC6.....	0,39	0,50	0,21	0,014	0,016	1,39	0,23	-	-	
PCS.....	0,50	0,40	0,82	0,018	0,008	1,05	0,42	-	-	
TMS1.....	0,36	1,00	1,34	0,022	0,012	0,33	0,99	-	-	
TC4.....	1,07	0,34	0,28	0,021	0,010	1,44	0,23	-	-	
T85.....	0,80	0,53	0,30	0,021	0,020	0,019	-	-	-	
KNS.....	0,17	2,10	1,02	0,007	0,012	25,00	18,37	0,24	-	
PCV.....	0,48	0,69	0,28	0,017	0,013	1,05	0,28	0,20	-	
M34.....	0,12	0,29	-	0,017	0,033	-	-	-	-	

Pratik önemi bakımından diğer etkenler de değişmemek kaydıyla belirli sıcaklık bölgelerinde genişleme ile ilgili ortalama düzeltme faktörlerinden istifade etmek suretiyle, en fazla ortaya çıkan yükseklik düşüşlerinin tespit edilmesi mümkündür. Bu ortalama değerler ancak diğer etkenler gözönüne alındığı takdirde tespit edilebilir. Genişleme derecesine etki eden en önemli faktörler; yığıma derecesi, çelikte kimyasal bileşim ile kenar ve kalınlık oranlarıdır.

Nikel ve daha fazla miktarda krom ilave etmek suretiyle genişleme çok kuvveti bir şekilde artırılır.(Wusatowski, 1963)

#### 4.5 HADDELEME HIZI

Haddelenen malzeme hızı ile haddelerdeki hızın yalnızca akma ayrılması ile ilgili bir düzleme uyum halinde olduğu bilinmektedir.

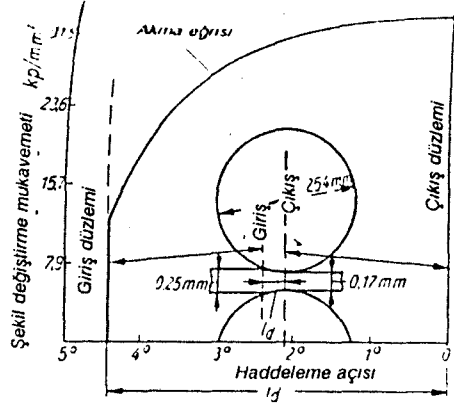
Haddelenen malzemenin hadde aralığı içerisinde her iki tarafa doğru aktığı yere akma ayrılması veya haddeleme aralığında akma ayrılmasının etrafında bulunan malzeme bölgesi denilir. Malzemenin haddeler arasında yığılması ve şekil değiştirme esnasında belirli bir malzeme hacminin yer değiştirmesi sonunda bu malzeme akışı meydana gelmektedir. Haddelenen malzemede haddeleme yönündeki hız (çıkış düzlemi yönünde), haddeleme aralığı içerisinde malzemenin akış hızı nispetinde artırılan hadde çevre hızına eşit olduğu takdirde, hızların yatay bileşenleri bir bileşke olmak üzere bir araya getirilebilir. Buna karşın giriş düzlemi yönünde hız azalmaktadır.

Haddelenen malzemede tüm şekil değiştirme safhası, sadece genişleme safhası olarak ortaya çıktığı takdirde geri yığılma hali meydana gelmez. Bu husus haddelemede pek nadir olarak ortaya çıkan bir durumdur. Şöyleki, sadece özel kalibrasyonlarda veya haddeleme aralığı içerisinde haddelenen malzeme her yerde hadde yüzeyine yapışır ve haddelenen malzeme ile hadde yüzeyi arasında hiçbir kayma hareketi meydana gelmediği takdirde bu durum söz konusudur. (Tarnovski, 1965)

#### 4.6 HADDE BASINCI

Yüzeyi ideal derecede düzgün kabul edilen iki plaka arasında bir malzeme numunesi sıkıştırılırsa, sürtünme olmaması nedeniyle gerilmenin tüm kesit boyunca eşit bir şekilde dağıldığı bir çekme deneyinde olduğu üzere aynı türden bir diyagram elde edilir.

Soğuk haddeleme safhasında da benzer bir durum ortaya çıkar. Yüzeyi ideal derecede düzgün iki hadde arasında metal bir malzemenin oda sıcaklığında şekillendirilmesinde ortaya çıkan ilişkiler şekil 4.30'da gösterilmiştir. Yaklaşık olarak %2-%3 arasındaki bir şekil değişiminde, metalde akma sınırının üstüne çıkılmakta ve haddeleme aralığında şekil değişiminin çoğalmasıyla birlikte, pekleşme sonunda akma eğrisi denilen bir eğriye göre malzeme mukavemeti artmaktadır.



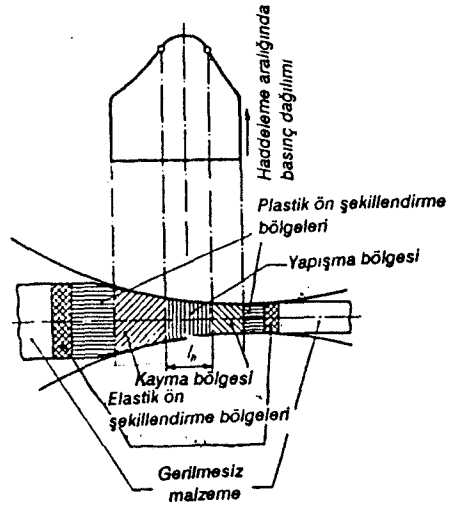
Şekil 4.30- Yüzeyi ideal derecede düzgün kabul edilen iki hadde arasında soğuk haddelemede pekleşme nedeniyle haddeleme aralığında malzemede akma gerilmesinin değişmesi.

Haddelme işleminde de sürtünme, muntazam olmayan bir gerilim dağılımına neden olmaktadır. Sürtünme kuvvetleri haddeleme aralığında iki farklı yönde etki etmektedir. En son araştırmalara göre, haddeleme aralığında bir yapışma bölgesi ortaya çıkmaktadır. Burada kayma sürtünmesi ile ilgili kuvvetlerden ziyade, sükunet halindeki sürtünmeden ileri gelen statik kuvvetler etkili olmaktadır.

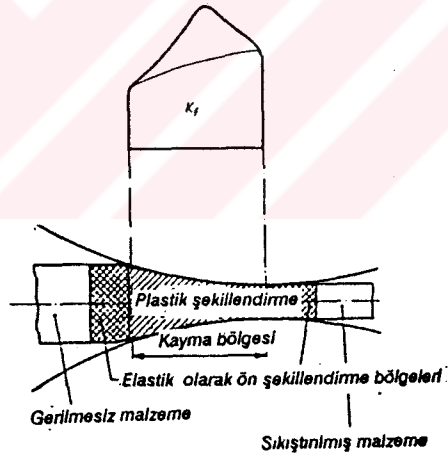
Sürtünme kuvveti haddeleme aralığında ortaya çıkan kayma gerilmesinden daha büyük olur olmaz, haddelenen malzeme hadde yüzeyine yapışmakta ve kayma safhaları da haddelenen malzemeye intikal etmektedir.

Haddelme aralığına giren çubuğun giriş düzlemi önünde, belirli bir kısmının haddeleme aralığında ortaya çıkan gerilme bölgesinin etkisi altına girdiği şekil 4.31'den anlaşılmaktadır. Gerilme bölgesinin etkisi, şekil değiştirmenin artması ile birlikte çoğalmakta ve haddeleme aralığına giren çubukta hemen giriş düzlemi önünde çubuk yüksekliğinin düşmeye başlamasına neden olmaktadır.

Sıcak haddelemede bir yapışma bölgesi ile bu bölgenin yanında iki kayma bölgesi, giriş ve çıkış tarafında ise şekillendirilmemiş malzemede plastik ve elastik ön şekillendirme bölgelerinin bulunduğu şekil 4.31'de görülmektedir. Buna karşın soğuk haddelemede (şekil 4.32), haddeleme aralığı içerisinde daha ziyade bir kayma bölgesi meydana gelmektedir. Giriş düzlemi önünde elastik bir ön şekil değiştirme bölgesi, bunun da önünde şekillendirilmemiş malzeme bulunmaktadır. Çıkış düzleminin gerisinde ise, tekrar bir elastik şekil değiştirme bölgesi ile bunun arkasında sıkıştırılmış vaziyette haddelenen malzeme bulunmaktadır.



Şekil 4.31 Sıcak haddelemede, haddeleme aralığında oluşan bölgelerin şematik olarak gösterilmesi

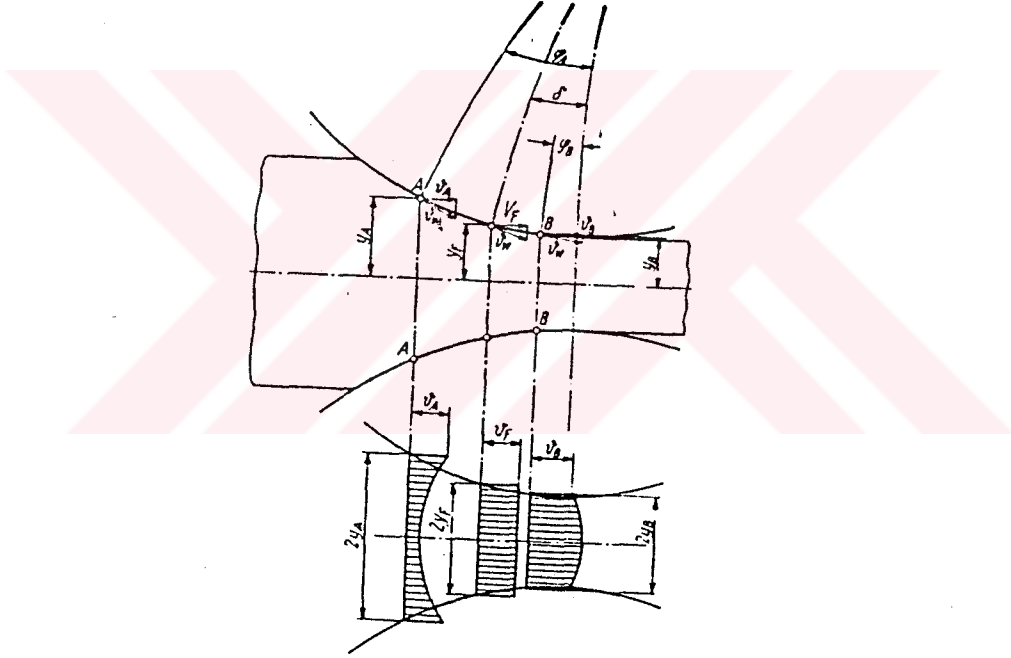


Şekil 4.32 Soğuk haddelemede, haddeleme aralığında oluşan bölgelerin şematik olarak gösterilmesi.

A-A ve B-B kesitlerindeki hız dağılımını şekil 4.33'de şematik olarak gösterilmiştir. Taranan üç yüzeyin birim zamanda, haddeleme aralığında akan malzeme hacmi ile orantılı olması nedeniyle bu yüzeyler alan itibariyle birbirine eşit olmak zorundadır.

Hadde aralığında hız dağılımı ile ilgili bir açıklama yapmak ancak çok zorlukla mümkündür. Düz pasolamalarda olduğu gibi hadde aralıklarında da akma ayrılması yakınında, benzer şekilde yapışma bölgeleri meydana gelmektedir. Bununla beraber bu bölgedeki büyüklüğü tesbit etmek çok zordur. Hadde aralığında basınçlar gayri muntazam bir şekilde dağıldığından, düşüşler farklı bir biçimde olduğundan ve bundan başka bağımsız kısmı kesitler arasında bir malzeme akışı meydana geldiğinden sürtünme koşulları çok karmaşıktır.

Bloğun hadde aralığına giriş ve çıkışında bir kayma sürtünmesi söz konusudur. Ancak akma ve sürtünme dirençlerini yenmek suretiyle, malzeme içerisinde yığılmalar meydana gelmediği takdirde, haddelenen malzemenin hadde yüzeyine yapıştığı yerde şekil değişimi ile bir malzeme akışı mümkün olmaktadır. (Wusatowski, 1963)



Şekil 4.33 Yapışma bölgesinin oluştuğu bir haddeleme prosesinde, hadde aralığındaki hız değişimi

#### 4.7 HADDELERDE YÜKLENME SINIRI

Haddeleme işleminde pasolama planına ideal durum olarak bakılmalıdır. Bu pasolama planında her pasoda mümkün olduğu kadar aynı olan maksimum bir haddeleme kuvveti, aynı tahrik momenti ve aynı güç sarfiyatı ile çalışabilmektedir.

Sıcak haddelemede birinci pasodan önce haddeleme sıcaklığına kadar ısıtılan malzeme haddeleme esnasında gittikçe soğumakta , böylece malzemede şekil değiştirme direnci artmaktadır. Şekil değişiminin artmasıyla birlikte malzeme sıkıştığında soğuk haddeleme esnasında da buna benzer bir etken mevcuttur. Bundan başka şekil değiştirme direncinde mevcut olan ve hadde yüzeyi ile haddelenen malzeme arasında meydana gelen sürtünme kuvvetleri payı büyüyecek ve şekil değiştirme direncinde buna uygun olarak artacağından hadde çapına oranla her iki durumda da bant kalınlığı azalacaktır. Soğuk ve sıcak haddelemede artan şekil değişimi ile birlikte şekil değiştirme direncinde görülen artış, paso sayısının artması ve düşme miktarının hafifletilmesini gerektirmektedir.

Sıcak haddeleme kuvveti ile enerji sarfiyatını sabit halde tutmak amacı ile değil, bilakis malzemede plastikleşme özelliği azaldığından ve malzeme daha yüksek bir şekillendirmeyi karşılayacak durumda olmadığından, şekil değiştirmenin arttığı soğuk haddeleme esnasında düşüşün hafifletilmesi zorunludur. Haddeleme sıcaklığı kuvvetli bir şekilde düştüğü takdirde eğer malzemede plastikleşme özelliği azalmışsa sıcak haddelemede buna benzer koşullar ortaya çıkabilir.

Kaba sacların haddelenmesinde örneğin; kare ve dikdörtgen kesitli çubuklarda ortaya çıkan düşme, genellikle malzeme kalitesine, mevcut motor gücüne ve hadde makinalarında izin verilen yataklama yüküne özellikle haddelere bağlıdır. Haddehanedeki tahrik gücüne ve malzeme kalitesine göre mümkün olan düşüşe kıyasla, prensip olarak kaba saclar daha küçük düşüşlerle haddelenmektedir. Bu gerçek şu esasa dayanmaktadır. Kaba sacların ekserisi plastikleşme özelliği büyük olan yumuşak çeliklerden imal edilmiştir. Ancak kaba saclar alaşımlı veya yüksek alaşımlı çeliklerden haddelendiği takdirde, bu saclarda düşük olan plastikleşme özelliğinin ilk pasolamalarda gözönüne alınması zorunludur. Bu malzemeler haddelenirken yumuşak çeliklerin haddelenmesinde meydana gelen haddeleme kuvvetlerine kıyasla, daha yüksek haddeleme kuvvetleri ortaya çıkmaktadır. Haddelerde izin verilen zorlamayı aşmamak bakımından düşüşlerin hafifletilmesi zorunlu hale gelmektedir. Buna göre çeşitli çelik kalitelerinden mamul hale getirilen saclar haddelenirken, haddede ortaya çıkan mekanik mukavemetin düşüşlerdeki büyüklüğe bir ölçü teşkil ettiği sonucu ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla düşüşler haddelerdeki mekanik mukavemet esasına göre tesbit edilmiş ise tahrik

motorundaki güç ancak istisnai hallerde yetersiz olabilir. Bu koşullar halinde düşüşlerin motor gücü gözönüne alınmak suretiyle tesbit edilmesi zorunludur. (Yılmaz, 1988)

#### 4.8 SICAK HADDELEME İŞLEMİNDE GENİŞLEME ve UZAMA

Haddelenen malzeme ile hadde arasında meydana gelen sürtünmenin, genişleme üzerinde büyük etkisi olduğu görülmektedir. Pürüzlü haddeler kullanıldığı takdirde genişleme kuvveti bir şekilde artmaktadır. Numune yüzeylerindeki tufalı yetersiz bir şekilde bertaraf edilmeside genişleme derecesini kuvvetli bir şekilde etkileyebilir. Özellikle haddeleme redüksiyonları yüksek olduğu takdirde, tufalın ortadan kaldırıldığı kısımlarda bu duruma rastlanmaktadır. Tufalın malzeme yüzeyine batması nedeniyle genişlemede kuvvetli bir artış meydana gelmektedir. Dolayısıyla söz konusu durumda, tufalın ortadan kaldırılması büyük bir önem taşımaktadır.

#### 4.9 YUMUŞAK ÇELİKTE HADDELEME ESNASINDA MALZEME AKIŞI ve MALZEME YAPISI

20x40 x300 mm ebatlarında olan numune çubuklara, üç sıra halinde 10 mm aralıklarla, 3.5 mm çapında ve 120 mm boyunda pimler çakılmıştır. (Şekil 4.34) Pim malzemesi olarak numune çubukları, elektrikle ısıtılan bir fırında 1150°C'ye kadar tavllanmış ve deneme haddesinde haddelenmiştir. Haddelenen numunede pimlerle donatılan kısım, haddeleme aralığına girer girmez haddeleme safhası aniden kesilmiştir. Merdane çapı 305 mm , redüksiyon % 60,70,80 ve 90 dır.



Şekil 4.34 Haddelenmeden önce üç sıra halinde pimlerle donatılan haddeleme numunesi.

Farklı düşüşlerde haddelenen, boylarına göre sıralanan ve asite daldırılan dört numune şekil 4.35'de gösterilmiştir. Bu numune parçalarında haddeleme esnasında farklı bir durum arzeden üç malzeme tabakası göze çarpmaktadır. Malzeme parçacıkları merdane çevresine

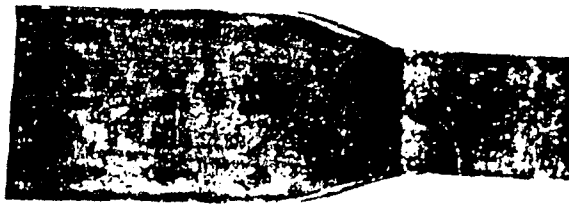
doğru paralel bir şekilde kayarken malzemede dıştaki tabaka, yüksek sürtünme katsayılarında hadde yüzeyine kuvvetli bir şekilde yapışmaktadış. Oldukça kalın olan çekirdek bgesi ise kenardaki tabakaya göre önemli bir derecede geri kalmaktadır. Her iki bölge arasında düşük kalınlıkta olmak üzere bir geçiş tabakası bulunmaktadır.



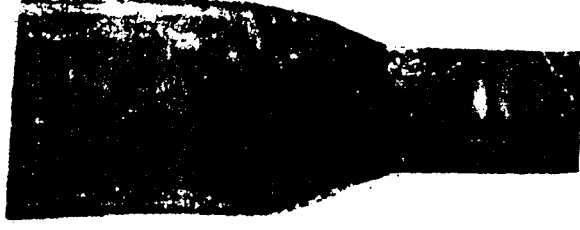
şekil 4.35 % 60,70,80,90 redüksiyonla haddeleme safhası kesildikten sonra haddeleme numunelerinden uzunlamasına alınan kesitler.

Artan redüksiyonla birlikte pimlerdeki şekil değişmesi kıyaslanırsa, kenardaki tabakada meydana gelen abuklaşmanın arttığı görülmektedir. Malzeme içerisinde meydana gelen bu farklı hız dağılımı elverişsiz koşullar altında iç yapı da zararlar neden olabilir.

%80 ve %90 redüksiyonla haddelenen iki haddeleme numunesi 4.36 ve 4.37'nci şekillerde gösterilmiştir. Her iki resimde verilen pimlerin görünüşüne göre, cidarlar dışa doğru sıkıştırılırken, haddelenen malzemenin çubuğun ortasında uzunluğuna istikamette olmak üzere, daha kuvvetli bir şekilde aktığı kolayca görülmektedir. Bu arada malzeme akışı, 4.38'nci şekilde verilen przly bir haddede haddelenen numunedeki görüntüden de anlaşılacağı gibi haddelenen malzeme ile merdane arasında ortaya çıkan sürtünme koşullarından son derece etkilenmektedir. Bu arada genişleme safhası her şeyden önce malzemenin, hadde çubuğu ortasından itibaren kenarlara doğru sıkışması sonunda meydana gelmektedir.



şekil 4.36 Pimlerle donatılan ve %80 redüksiyonla haddelenen haddeleme numuneleri.



Şekil 4.37 Pimlerle donatılan ve % 90 redüksiyonla haddelenen haddeleme numunesi.

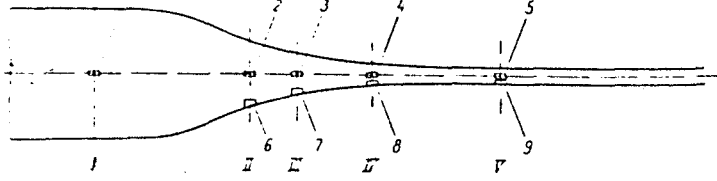


Şekil 4.38 Pürüzlü merdanelerde % 96 redüksiyonla haddelenen 20x20 mm ebatlı haddeleme numunesi.

Haddelenen numunelerden elde edilen görüntüler yapışma , geri yığılma ve çabuklaşma bölgelerine geri dönmek bakımından önemli ilişkiler kurulmasına ve aynı şekilde hız ve basınç dağılımı hakkında da bir fikir edinilmesine imkan vermektedir. Redüksiyonların büyük olduğu haddeleme işleminde, yapışma bölgesinin çok geniş olduğu görülmektedir. Çünkü numune yüzeyinden çıkan malzeme haddelerde yapışıp kalmaktadır. Bu geniş yapışma bölgesi büyük redüksiyonlarla yapılan haddelemede, haddeleme aralığında meydana gelen prosesleri çok kuvvetli bir şekilde etkilemek zorundadır.

Büyük redüksiyonlarla yapılan haddeleme işleminde muhtelif istikametlerde meydana gelen şekillendirme derecesi çok farklı olduğundan, kısmen yöne bağlı mukavemet özellikleri ile farklı bir malzeme yapısı elde edilmektedir. Şekil değişmesi ne kadar büyükse, anizotropi de o nispette büyüktür. Şekil 4.39'da gösterilen numunede belirtilen kısımlarda, taşlama resimleri hazırlanmış ve sertlik ölçmeleri yapılmıştır. Bu türdeki haddeleme numuneleri, % 50 -% 90

arasındaki redüksiyonların ortaya çıktığı 40x40 mm boyutlarındaki çubuklardan alınmıştır. Büyük redüksiyonla haddelenen yumuşak çelik farklı bir yapı arz etmektedir. Bu yapı, şekillendirme derecesi ve hadde yüzeyindeki verilen ısı iletimi ile yakından ilgilidir.



Şekil 4.39 40x40 mm ebatlarında olmak üzere haddelenen kare şeklindeki bir numune çubukta metalografik ve sertlik numunelerinin alındığı yerler.

Tablo 4.40 Şekil 4.39'da gösterilen numunelerdeki sertlik ölçme sonuçları.

Ölçme İşleminin Yapıldığı yer	I	II	III	IV	V
Orta .....	112	135	148	187	203
Kenar .....	123	171	183	199	210

Sertlik doneleri Vickers sertlikleridir

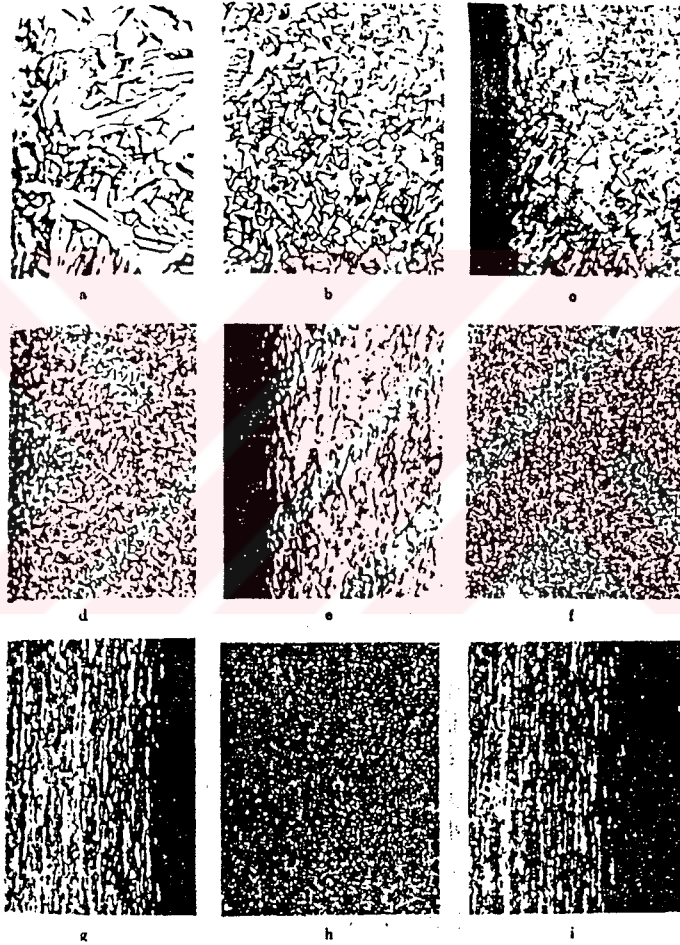
Malzeme bünyesi ile ilgili olarak şekil 4.41'de, a'dan i'ye kadar verilen görüntüler, haddeleme safhasını tanımlamak açısından belirli bazı bilgiler elde edilmesine imkan vermektedir. Şekil 4.41'de fırında tavlandıktan sonra meydana gelen ilk yapıyı göstermektedir. Malzeme yapısı gelişi güzel dağılan perlit ile kaba ferrit'den ibarettir. Redüksiyonun artışı ile birlikte ferrit taneleri kırılmakta ve malzeme yapısında gitgide ince taneli bir şekil almaktadır.

Yaklaşık %50-80 arasındaki bir düşüşten sonra malzeme yapısı çok ince taneli ferrit ile perlit'ten oluşmaktadır. (Şekil 4.41 b,d, f ve h) Kenardaki tabakalarda ortaya çıkan malzeme yapısı, soğuk şekillendirme etkisini belirli bir şekilde ortaya koymaktadır. Çünkü hadde yüzeyine verilen ısı iletimi o derece kuvvetlidir ki malzeme hemen hemen hiç bir şekilde kristalleşme imkanı bulamamaktadır. Bu bölgede malzeme sıkışmaktadır. (Pekleşme)

Şekil değişmesi % 50'nin üstüne çıkar çıkmaz kuvvetli bir yapı incelmeye izlenmektedir. (Şekil 4.41 c) % 70 dolaylarındaki redüksiyonda (Şekil 4.41 c) taneler belirli bir şekilde uzamaya başlamaktadır. Şekil değişmesinin çoğalmasıyla birlikte (Şekil 4.41 g ve i) kristal

tanelerinde meydana gelen bu uzama ile yönelme sonucunda kristal taneleri bir dokuma karakteri alacak şekilde belirginleşmektedir.

Malzeme yapısına ilişkin resimler yardımı ile ilerleyen şekillendirme ile birlikte, numune ortasında önemli bir düzeyde tane incelmesi meydana geldiği ispat edilmektedir. Numunelerde çekirdek kısmındaki ısı , kenarda ki tabakalarda olduğu gibi hemen çabucak iletilmediğinden kenardaki tabakalar sıra şeklinde bir yapı arz ederken burada düzenli bir yeniden kristalleşme olayı meydana gelmektedir. (Wusatowski, 1963)



Şekil 4.41- 4.40'uncü şekle göre numune parçalarından elde edilen taşlama resimleri.

- a) Kısım 1; haddelemeden önceki ilk yapı perlit ile birlikte kaba ferrit.
- b) Kısım 2; ince taneli ferrit ve perlit , % 50 şekil değişimi
- c) Kısım 6; ince bir yapı olan ferrit taneleri, % 50 şekil değişimi
- d) Kısım 3; kuvvetli bir şekil alan tane incelmesi, % 70 şekil değişimi

e) Kısım 7; haddeleme yönünde olmak üzere kenardaki tabakada tanelerin uzatılmaya başlanması, % 70 şekil değişimi

f) Kısım 4; düzgün ve çok ince tane yapısı, % 80 şekil değişimi

g) Kısım 8; kenardaki tabakada ince, bununla beraber haddeleme yönünde uzatılan tane yapısı, % 80 şekil değişimi

h) Kısım 5; çok kuvvetli bir şekilde tane incelmesi, % 90 şekil değişimi, uzunlamasına istikamette uzatılan ve yeniden kristalleşmeyen tane yapısı.

Resimlerin tamamı 125 defa büyütülmüştür.



## 5 HADDELENEBİLİR MALZEMELERİN İNCENLENMESİ

### 5.1 ÇELİKLERİN HADDELENMESİ SIRASINDA OLUŞAN İÇ YAPININ İNCELENMESİ

Çelik sanayiinde imal edilmekte olan birçok ürün son şeklini sıcak şekillendirme sırasında almaktadır. Bunların, kimyasal bileşimi ve iç yapı karakteristiklerine bağlı olarak mekanik ve teknolojik özellikleri kesin bir şekilde saptanabilmektedir. İç yapının homojenliği ve ince taneli olması yüksek mukavemet ve dayanıklılık değerlerinin elde edilmesi için belirleyici faktörlerdir. Ürün kalitesinin iyileştirilmesi, şekillendirme sırasında ve sonrasında malzemedeki iç yapı oluşumu üzerinde bilgi sahibi olmayı şart koşmaktadır. Termomekanik şekillendirme sırasında, faz dönüşümleri nedeniyle iç yapı değişimleri, çökeltilerin çözünme veya çökmesi, tane irileşmesi, şekillendirme sertleşmesi ve gevşeme ile yeniden kristalleşme sonucu dinamik ve statik dayanıklılık düşmesi meydana gelmektedir. Bütün bu olaylar termik olarak aktif hale getirilebilir prosesler olduğundan büyük ölçüde sıcaklığa ve zamana bağlıdır. Bunlar kısmi olarak aynı anda meydana gelirler, birbirlerine bağlıdır ve birbirleriyle karşılıklı olarak etkileşim içerisindedirler.

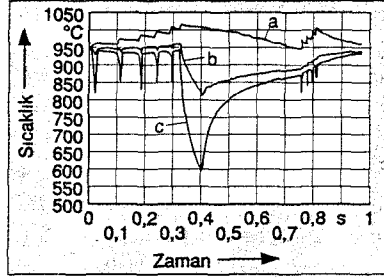
Şekil 5.42'de gösterilen hesaplamaların sonucu şekil 5.43'de verilmiştir. Kesit üzerindeki iç yapı oluşumunda önemli farkların mevcut olduğu belirlenmiştir. Bu durum deneysel olarak doğrulanabilmiştir. İlk haddeleminin ardından, kenar bölgedeki iç yapı dinamik ve statik olarak kısmen yeniden kristalleşir. Herşeyden önce, toparlanma sebebiyle malzemede bir dayanç kaybı gözlenir. Numune çekirdeğinde ise yüksek lokal şekil değiştirme ve yüksek sıcaklık sonucuyla tam bir yeniden kristalleşme kaydedilmektedir. Ostenit tanesi nispeten çok küçüktür. Daha sonraki haddeleme basamaklarındaki artan şekillendirme oranı ile iç yapı farkları gittikçe daha fazla dengelenmektedir. Şekillendirme sertleşmesi kenar bölgelerde toplanmaktadır. Bu ise sözkonusu haddeleme basamağındaki iç yapı oluşumu için sadece şekillendirme derecesinin belirleyici olmadığı anlamına gelmektedir. Termomekanik ön işlem basamağıda değerlendirmeye dahil edilmek zorundadır. Onuncu haddeleme basamağında iç yapı dayanımı tamamen yitirmiştir. Homojen, ince taneli ve düzenli bir iç yapı oluşmuştur. (Şekil 5.43)

Haddelenerek üretilmiş soğuk şişirilebilir ve gerilebilir kalitedeki tel ürünler burada tanıtılmaktadır. Haddeleme işlemi, kesiti 150 mm x 150 mm olan bir yarı mamulden 23 veya 25 haddeleme kademesi ile 5 - 14 mm aralığındaki bir çapta tel üretebilecek sürekli tel haddeleme hattında gerçekleştirilmelidir. 18. basamaktan itibaren tel, hadde bloğu içerisine girer.

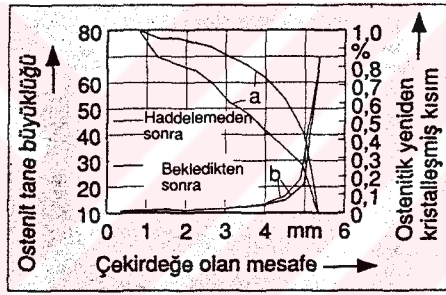
Hesaplama varyasyonları, 950 ile 1150°C arası bir hadde sıcaklığını esas almaktadır. Bu nedenlerden dolayı başlangıç tane büyüklüğü olarak  $Do=150$  um almak doğru görülmektedir.

Şekil 5.44'de yaklaşık olarak ön gerilmeli beton çelik teller için kullanılan yüksek karbonlu çelik tellerin (çapı 8 mm) haddelenmesi sırasındaki sıcaklık değişimini göstermektedir. Ön hattaki haddeleme hızlarının nispeten düşük olması sonucu haddeleme basamakları arasındaki durma süreleri daha uzundur. Haddelenen malzemenin ortalama sıcaklığı haddeleme hızına bağlı olarak yaklaşık 30-60°K dolayında düşmektedir. Haddeleme hızı ne kadar düşüğe zorunlu olarak o derecede düşük bir sıcaklık tabanı ortaya çıkmaktadır. Tel haddeleme bloğundaki haddeleme kademeleri arasındaki kısa mesafeler ve yüksek haddeleme hızları nedeniyle haddelenen malzeme çok fazla ısınmaktadır. Entalpi değişikliği ise beklendiği gibi en yüksek haddeleme hızında en kuvvetli şekilde belirginleşmektedir. Haddeleme hızının yarıya düşürülmesi halinde haddeleme hattının sonunda yaklaşık 50°K mertebesinde bir sıcaklık düşmesi kaydedilmektedir. (Şekil 5.43a) Fakat, haddeleme hızının iç yapıya olan etkisi toplamda düşüktür. (Şekil 5.43b) Artırılmış şekillendirme hızlarının tane inceltme etkisi sıcaklığın artmasıyla azalarak büyük ölçüde dengelenmektedir. Önceden kalibrasyon yapılmış somut bir durumda, başlangıç haddeleme sıcaklığının değiştirilmesi ile prosesin etkilenmesi veya yönlendirilmesi çok kolay bir şekilde mümkün olmaktadır. Bunun düşük alaşımli bir soğuk şişirme çeliğinin iç yapısına nasıl etki ettiği şekil 5.45'de gösterilmiştir. Başlangıç haddeleme sıcaklığı 950 ile 1150 °C arasında değiştirilmiştir. Karakteristik sıcaklık dağılımı germe çeliğinin haddelenmesindeki ile aynıdır. (Şekil 5.44a) Başlangıç haddeleme sıcaklığının 100 °K değerinde azaltılması karşısında son haddeleme sıcaklığı 30 °K düzeyinde bir düşme göstermektedir. Daha düşük başlangıç sıcaklıkları daha yüksek akma gerilmeleri ve böylelikle haddelenen malzemelerin daha fazla ısınmasını beraberinde getirmektedir. Tane inceltmesi ön hat bölgesinde gerçekleşmektedir. Başlangıç sıcaklığının 100 °K mertebesinde düşürülmesi ile ostenit tane büyüklüğü birinci haddelemeden sonra 20 ile 30 um dolayında değişmektedir. (Şekil 5.45b)

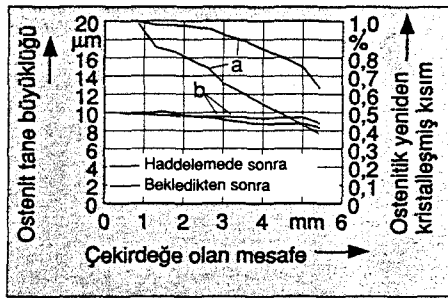
Ostenitik iç yapı genellikle tamamen yeniden kristalleşir. İkinci ara ve imalat hattında tane büyüklüğü hemen hemen sabit kalmaktadır. Haddelemeden sonra iç yapının tane büyüklüğü seviyesi ilk planda son haddeleme sıcaklığına bağlıdır. Haddeleme blokuna girmeden önce haddelenen malzemeye yoğun bir ara soğutma yapılması ile son haddeleme sıcaklığını 950 °C'ye düşürmek mümkündür. Son tane büyüklüğü 29'dan 15 um'ye düşürülmüştür. Sıcaklığı 850 °C'ye düşürebilmek için son iki haddeleme kademesinden önce ikinci bir soğutma aralığının verilmesi anlamlı olmaktadır. Böylelikle son tane büyüklüğü 11 um'ye düşürülebilecektir. (Makina Magazin, 1996)



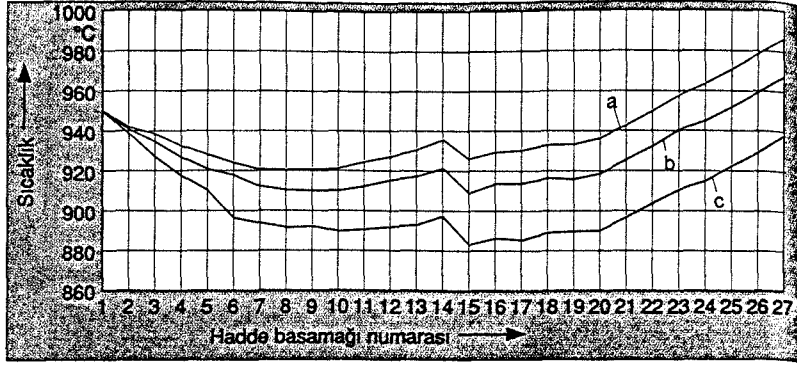
Şekil 5.42 Bir tel hattının son on basamağındaki sıcaklık değişimi (Malzeme 34 Cr 4, başlangıç sıcaklığı 950 °C ve 50 m/s) a-Çekirdek, b-Orta Bölüm, c-Kenar



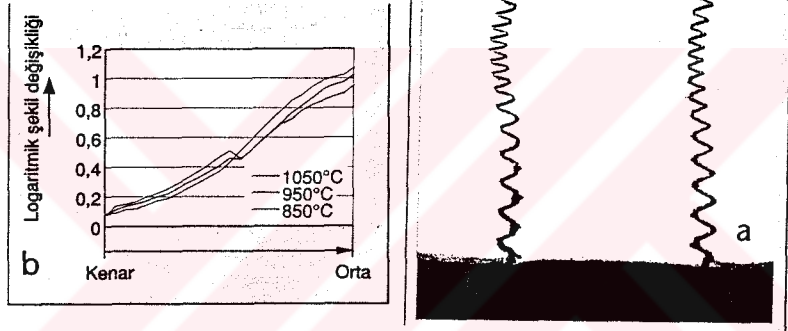
Şekil 5.43 İlk basamaktan sonraki yükseklik boyunca lokal iç yapı parametreleri (Malzeme 34 Cr 4, hadde sayısı 10, başlangıç sıcaklığı 950 °C) a-Oran, b-Tane Büyüklüğü



Şekil 5.44 Onuncu basamaktan sonra yükseklik boyunca lokal iç yapı parametreleri (Malzeme 34 Cr 4, hadde sayısı 10, başlangıç sıcaklığı 950 °C) a-Oran, b-Tane Büyüklüğü



Şekil 5.45 Beton çeliğin telin haddelenmesi sırasındaki sıcaklık değişimi (çap 8 mm, başlangıç sıcaklığı 950 °C)



Şekil 5.46 Haddelenen malzemenin yüksekliğince (a) görsel plastik inceleme ve (b) şekillendirmenin dağılımı.

## 5.2 HADDELEMEDE ÇELİK ve ALAŞIMLARININ YAPILARINDA OLUŞAN ETKİLER

Kimyasal bileşim, eritme ve döküm koşulları, döküm metalin ön deformasyon karakteri ile deforme edilen metalin makroskobik ve mikroskobik yapıları, çelik ve alaşımlarının başlangıç özellikleri olarak ifade edilirler.

Katı çözeltilerin haddelenebilme kabiliyetleri, ana elementin plastik özelliklerine göre belirlenir. Ferro-Nikel alaşımlarının haddelenebilme kabiliyetleri, demir ve nikelin her ikisinde iyi plastik özelliklere sahip olmalarından dolayı oldukça iyidir. Bu aynı zamanda üç bileşenli alaşımlar içinde geçerlidir. Bu durumda Ferro-Krom -Nikel 'den oluşan ve krom içeriği % 8'den fazla olmayan bir alaşımın haddelenebilme kabiliyeti saf demirinki kadar iyi olur. Elementler katı çözelti içerisinde tam olarak çözülmedikleri takdirde plastisite azalır.

Fakat tane içindeki ve tane sınırındaki kalıntılar olarak metal içerisinde oluşan ve kalıntı fazı adı verilen fazları oluştururlar. (Örneğin; Sülfürler ve Sülfür ötektikleri, Alüminyum oksitler)

Saf maddelerin ve mikroskobik boyutta farklı element ilavelerinin kullanılmasının, haddelenebilme kabiliyetine etkileri olduğu gözönüne alınmalıdır. Çelik veya alaşımlarının bir kısmındaki ayrı elementlerin bileşenlerinin uygunluğu ve metal içindeki üniform olmayan element dağılımında büyük önem arzeder. (Tarnovski, 1965)

### 5.3 FARKLI ELEMENTLERİN ÇELİĞİN PLASTİK ÖZELLİĞİNE ETKİLERİ

Demir: Kimyasal saf demir ve ticari saf demirin haddelenebilme kabiliyetleri arasında büyük fark vardır. 1000°C civarındaki bir sıcaklıkta ticari saf demirin azalmış bir haddelenebilme kabiliyetine sahip olmasına karşın kimyasal saf demirin haddelenebilme kabiliyeti yüksektir.

Karbon: Farklı karbon içeriğine sahip çeliklerin haddelenebilme kabiliyetleri karbonun kendisine nazaran daha çok dikkate alınır. Çeliğin karbon içeriği % 1.7'i aşmadığı taktirde katı çözeltideki karbon , demir ile birlikte 1050°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda Östenit oluşturur. Bu durumda karbon içeriği % 1.4'e kadar olan çeliğin haddelenebilme kabiliyeti demir'inkine tekabül eder ve karbon içeriği % 1.4-1.7 aralığında olduğu zaman haddelenebilme kabiliyeti azalır. Çelikteki karbon miktarı % 1.7'nin üzerinde ise Östenit'e ilaveten Ledeburit ve Sementit'de oluşur. Bu da haddelenebilme kabiliyetinde keskin bir azalmaya neden olur.

Manganez: Manganez'li çelikler aşırı ısıtma için uygundur ve ısıtmanın özel sıcaklık koşullarının kati suretle sabit kalmasını gerektirirler. Manganez'in çeliğin plastik özelliklerine olumlu bir etkisi vardır. Çünkü demir-sülfürlerin aksine tane sınırlarında mangan sülfürler oluşmaz.

Silisyum: Çelikteki silisyum katı halde ise haddelenebilme kabiliyetine hiç bir etkisi yoktur. Çeliğin silisyum içeriği % 3'ün üzerinde olduğu taktirde haddelenebilme kabiliyeti düşer. Silisyum oksitin oluşturduğu şeffaf fazın haddelenebilme kabiliyetine olumsuz etkisi vardır.

Kükürt: Bozucu bir artık maddedir. Kolay eriyebilir olmaları nedeniyle kükürt bileşikleri yüksek sıcaklıklarda sıvılaşır ve tane sınırları arasında akarak, tanelerin tüm bağlarına hasar vererek sıcak büzülme olarak adlandırılan olaya sebep olurlar.

Yapıda manganez varsa ve artan oksijen içeriği ile artıyorsa kükürdün etkisi kısmen azalır. Çelikteki kükürt içeriğindeki artış demir-sülfürlerin ve erime sıcaklığı 950°C'nin altında olan ötektiğin oluşumunu kolaylaştırır. Yüksek ısıtma sıcaklıklarında tanelerin bağları hasar

görür ve bu nedenle sıcak plastik deformasyon süresince çatlak ve kırıkların oluşumuna neden olur.

Kükürt diğer bazı elementlerle (Nikel, Molibden) birleşerek sülfürleri oluşturur. Nikel ve Molibden çeliklerinde taneli sülfür ağının oluşumundan kaçınmak için bunların kükürt içerikleri minimum düzeyde olmalıdır. Kalay ,Kurşun, Arsenik ve Bizmut'da tane bağlarını uyarırlar.

Oksijen: Kükürt'e benzer bir şekilde oksijende sıcak büzölmeye sebep olur. Çünkü oluşan oksitler düşük erime sıcaklıklarına sahiptirler ve tane sınırlarına nüfuz ederler. Çelik içerisinde oluşan serbest gazlar, çeliğin haddelenebilme kabiliyetini azaltırlar. Oksijen ve Azot ayrı ayrı oksit ve nitrat oluştururlar.

Fosfor: Fosfor demirin katı çözültisi içerisinde çözülmüş ise karbon çeliğinin haddelenebilme kabiliyetini kötüleştirmez. Çeliğin fosfor içeriğindeki artış, plastik deformasyon süresince çeliğin soğuk büzölmesine neden olur.

Bakır: Saf bakırın yüksek bir haddelenebilme kabiliyetine sahip olduğu gerçeğine karşın katı halde değilse, özellikle de tane sınırlarında çökeltmiş ise çelik veya alaşımı içerisindeki mevcudiyeti, kafesin plastik özelliklerini kötüleştirir. Yapıdaki serbest bakır sıcak büzölmeye neden olur.

Çeliği sıcak veya soğuk büzen bazı elementler, farklı çeliklere özellikle katılırlar. Örneğin; Kükürt, Fosfor ve Kurşun aynı amaç ile katılırlar. Bakır çelikleri korozyona mukavim çelikler olarak kullanılırlar.

Nikel: Demir-Nikel alaşımlarındaki nikel içeriğinin haddelenebilme kabiliyetine herhangi bir etkisi yoktur.

Krom: Haddelenebilme kabiliyetini azaltan ve yeniden kristalleşme esnasında tane boyutunu artıran bir gerilime sahip olan aşırı ferritik, alfa fazının oluşumunu kolaylaştırır.

Molibden : Tane sınırlarında sülfür oluşturabilir ve kabuk tabakasının altına nüfuz edebilir. Nikel-Molibden alaşımlarındaki Molibden içeriği % 20'nin üzerinde olduğu zaman bu alaşımların işlenebilirlikleri kötüleşir.

Tungsten : Tungsten yeniden kristalleştirmede tane büyümesini güçleştiren karbürlerin oluşturulmasını kolaylaştırır. Deformasyona karşı direnci oldukça iyileştirir.

Vanadyum: Tane boyutunu küçültmek için çeliğe küçük miktarlarda katılır. Yüksek sıcaklıklarda tane büyümesini güçleştirir.

Bor : Bor ilaveleri güç işlenebilen çelik ve alaşımların haddelenebilirliklerini büyük ölçüde artırır.

(Burtsev, 1973)

#### 5.4 DÜŞÜK KARBONLU ÇELİKLERİN MİKRO YAPISININ İNCELENMSİ

Düşük karbonlu sac çeliklerinin bileşimleri sadece küçük bir aralıkta değişmesine rağmen, bileşimlerindeki demir harici elementlerin miktarlarındaki çok küçük farklılıklar bile haddelene ve şekillendirme özelliklerinin etkileyebilirler. Bazı bileşimler % 30'dan daha az miktarlarda demir harici elementler içerirler. Buna karşın haddelenmiş sac ve ince levhaların yaklaşık % 80'ni aşığıdaki seviyeler arasındaki bileşime sahiptirler.

Karbon ; % 0.03-0.12

Manganez; % 0.2-0.6

Silisyum ; % 0.02-0.15

Fosfor ; maksimum % 0.04

Kükürt ; maksimum % 0.04

Bu çeliklerin normal karbon içeriği % 0.06 ile % 0.12 arasındadır. Ekstra düşük karbonlu bileşimlerin manganez içerikleri yukarıda listelendirilmiş seviyelerin alt sınırına yakındır.

Deoksidasyon Uygulamaları:

Düşük karbonlu sac çelikleri çemberli, yarı doymuş veya doymuş ingotlardan sac şekline haddelenirler. Bir çemberli çelikte (en geniş alanda kullanılan), sıvı metal ingot kalıbı içerisinde katılaştırırken, çözülen oksijenin karbon monoksit oluşturmasına müsaade edilir. Çemberlenme olayı ingotun ortalama karbon içeriğini azaltır ve mevcut karbon , fosfor ve kükürtün katılma boyunca ingotun üst noktalarına ve merkezine doğru Segregasyona sebep olur. İngotun yüzeyi artık maddeler içermeyen veya aşırı saflıkta bir demir kabuktan oluşur. Kimyasal ve mekanik olarak izole edilmiş çelikler, çemberli çeliklerin değişik türleridir. Kimyasal olarak izole edilmiş çelikler kalıp içerisinde 1-3 dakika içerisinde çemberlenirler. Sonrasında çemberlenme işlemi, dış taraflarda hızlı katılaşmaya imkan veren alüminyum ve ferro silikonların dış taraflara ilavesi ile durur. Mekanik olarak izole edilmiş çelikler, üst kısmında oldukça küçük bir ağız olan özel dizayanlı bir kalıba dökülür. Çoğalma ve deoksidasyondan hemen sonra kalıbın üst tarafındaki açıklıkta ağır bir dökme demir kabuğu oluşur ve metal seviyesi yükselince, metal kabuğa vururken gazın gelişimi oluşan basınçla durdurulur. İzole edilmiş çeliklerin aşırı saflıkta ve demir kabuğun ince olması durumunda normal çemberli çeliklere nazaran daha az segregasyona uğramaları gibi bir avantajları vardır.

Yarı doymuş çeliğin katılaşması ferro-silisyum veya alüminyum ilavesi ile kontrol edilir. Doymuş çelik sadece alüminyum ilavesi ile katılaştırılır. Alüminyum'lu doymuş çelik büyük ölçüde sert şekil vermeye veya haddelenmeye maruz kalan soğuk haddelenmiş saclarda ve bozulmama özelliklerinden dolayı şekil verme işleminden önce uzun süreler bekletilen saclarda

kullanılır. Gerçekte alüminyumlu doymuş çeliklerin temel avantajları yüksek şekillendirilebilirlik ve çökelme yaşlandırmasına uğramamalarıdır.

**Tavlama Etkisi:**

Dönüşme sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklıkta bitirme işlemi uygulanan sıcak haddelenmiş bir sacda, son soğutma işlemi karbür özelliklerini belirler. Soğutma sıcaklıklarındaki tane boyutu varyasyonları, tane boyutu ve karbür biçimini belirlemekle görevlidirler.

Sert bir temper istenmediği müddetçe soğuk haddelenmiş saclar genelde tavlanmazlar. Normalleştirme işlemi sıcak ve soğuk haddelenmiş saclarda uygulanır. (ASM Handbook Committee, Vol.7)

### 5.5 ÇİNKO VE ÇİNKO ALIŞIMLARININ MİKRO YAPISININ İNCELENMESİ

Çinko'da yaygın olarak bulunan elementler kurşun, demir, cadmiyum, alüminyum, titanyum ve kalay'dır. Kurşun, cadmiyum ve demir, çinko içerisindeki doğal kalıntılardır. Çinko hadde alaşımları genelde konsantrasyon içindeki miktarları % 1'i geçmeyen oranlarda kurşun, demir, cadmiyum, bakır ile tek veya bileşik halindeki titanyum içerirler. Mikro yapılar üzerinde bu elementlerin etkileri aşağıda açıklanmıştır.

**KURŞUN :** % 0.9'luk kurşun içeriği ve çinko kristali sıvı ötektik sıcaklığı olan 318 °C'nin altında oluşur. Bunun sonucunda dökme çinko'da, kurşun dentrit sınırlarında küçük küresel damlacıklar şeklinde görünür. Yumuşaklıklarından dolayı bu damlacıklar zımparalama esnasında mikro yapıda siyah olarak görünen delikler oluşturarak kopabilirler. Haddelenmiş çinko'da kurşun parçaları haddeleme yönünde uzar ve yeniden kristalleşen tane sınırlarında yerleşmeleri istenmez.

**CADMİYUM :** Cadmiyum parçaları çinko alaşımlarının çoğunda katı çözelti içindedirler ve döküm yapıda çekirdeklenme haricinde mikro yapıda herhangi bir değişiklik yaratmazlar. Haddelenmiş çinko'da cadmiyum, katı çözeltide kalır ve gerilme, sertlik ile büzülme direncini artırır, yeniden kristalleşme sıcaklığını yükseltir.

**DEMİR :** Çinko içinde % 0.001'den fazla miktarda demir bulunuyorsa, yaklaşık % 6 demir'den oluşan metaller arası bileşikler halinde iç yapıda görünür. Parça boyutları, demir miktarı ve ısı durumu ile kontrol edilir. Döküm içerisindeki ince tanecikler, uzun bir ısıtma sonucunda (36 saat, 371 °C) kaba şekle dönüşebilirler. Çinko'da haddeleme karakteristiklerini etkilediği ve sertliği düşürdüğü için bu çok önemlidir.

Kurşun'da olduğu gibi demir-çinko bileşimi dendrit sınırlarına yerleşir. Demir-çinko haddelendiğinde, demir-çinko parçacıkları haddeleme doğrultusunda uzarlar. Haddelenmiş

çinko'daki konsantrasyon ve bileşim içindeki demir parçacıkları, tanenin aşırı büyümesini önleyerek tane büyümesini kontrol ederler.

**BAKIR** : Çinko içinde % 1'den fazla miktarda bulunursa, dökme yapı içerisinde katı haldedir ve çekirdekli mikro yapıya yol açar. 204 °C civarında sıcak haddelene süresince, bakır aşırı doymuş katı halde kalır. Soğutma sırasında çinko-bakır epsilon fazlarının bazıları yeniden kristalleşen tane sınırlarına yerleşirler. Oda sıcaklığına yakın sıcaklıklarda uzun süre kalınırsa epsilon fazı tane sınırlarında kalmaya devam eder ve son olarak tane içine yerleşir. Soğuk haddelene yapılırsa, epsilon fazı soğuk işlenen yapıda hızlıca hareket eder ve bol miktarda bulunur.

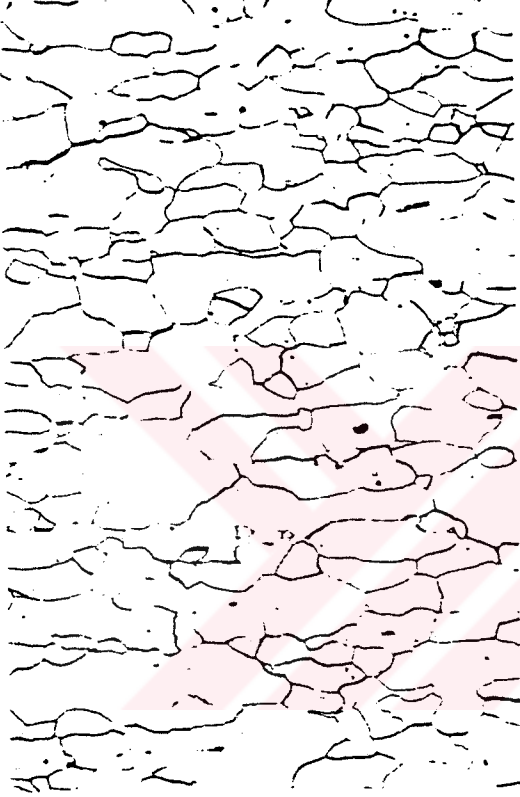
**TİTANYUM** : Titanyum'un çinko içinde katı çözünebilirliği oldukça sınırlıdır. % 0.12 titanyum oranında, çinko ve  $TiZn_{15}$ 'den oluşan bir ötektik meydana gelir. Ötektik, döküm içerisinde dendrit sınırlarında oluşur.  $TiZn_{15}$  bileşimi çinko'nun döküm tane boyutunu küçültür ve çalışılan sıcaklıkta haddelenmiş çinko'nun tane büyümesini engeller. Haddelenmiş çubukta, bileşimin parçacıkları haddelene yönünde uzarlar. Çinko'nun tane büyümesi, bileşik çizgilerinin arasındaki boşlukla sınırlıdır.

**ALUMİNYUM** : 382 °C'de % 5 alüminyum miktarında, alüminyum (primer alfa) ve çinko (beta) katıları arasında bir ötektik oluşur. Ötektiğin primer alfası sadece 275 °C'nin üzerinde sabittir. Daha düşük sıcaklıklarda ötektoid olarak alfa ve beta fazlarına dönüşür. Ötektik sıcaklıkta çinko içindeki alüminyum katısı % 1 olmasına rağmen, % 0.1'den daha az alüminyum içeren dökümler dendritik bölgeler arasındaki ötektik yapıyı gösterirler. % 4 civarında alüminyum içeren çinko-döküm alaşımlarının katılaşmaları esnasında katılaşan ilk malzeme, çinkoca zengin katı çözeltilinin birincil parçaları beta'dır. Kalan sıvı ötektik beta bileşeni ve sabit olmayan yüksek sıcaklık bileşeni, primer alfa katılaşır. Alüminyum dökme çinko içinde bir tane rafine edicisi görevi görür ve sonuçta basınçlı döküm alaşımları oldukça ince homojen tane yapısına kavuşurlar. İstenilen bu yapı haddelenebilme kabiliyeti ve gevrekliği için geçerlidir. Alüminyum'un büyük çoğunluğu hafif artırılmış sıcaklıkta yaşlandırma çok daha kısa sürede çökebilir. Benzer yaşlandırma etkileri, gerilme dayanımı ve sertliği arttırmak için katılan bakır içeren alaşımlarda da gözlenir. % 78 çinko ve % 22 alüminyum içeren ötektoid bileşimindeki dövme alaşımları aşırı plastik özelliklerinden dolayı daha çok kullanılmaktadır.

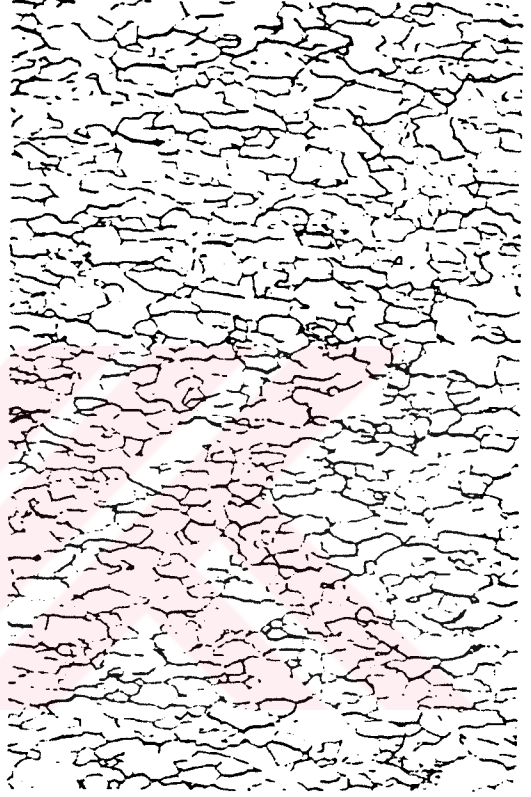
**KALAY** : Kalay 198 °C'de % 91'lik bir kalay oranında çinko ile düşük sıcaklıkta eriyen bir ötektik oluşturur. Kalay'ın katı çinko içindeki çözünürlüğü oldukça kısıtlanmıştır. Çinko-kalay ötektiği % 0.001'den daha düşük kalay içeren alaşımlarda ortaya çıkar. Çinko'ya kalay ilavesinin yapıldığı tek belirgin örnek sıcak galvanizleme işlemleridir. Galvanizlemede kalay

ilaveleri kabukta parlak, pürüzsüz beyaz pulların oluşumunu düzenlemekte yaygın olarak kullanırlar. Sıcak haddelenmiş çinko içerisinde kalay varsa sıcak büzölmeye neden olur.

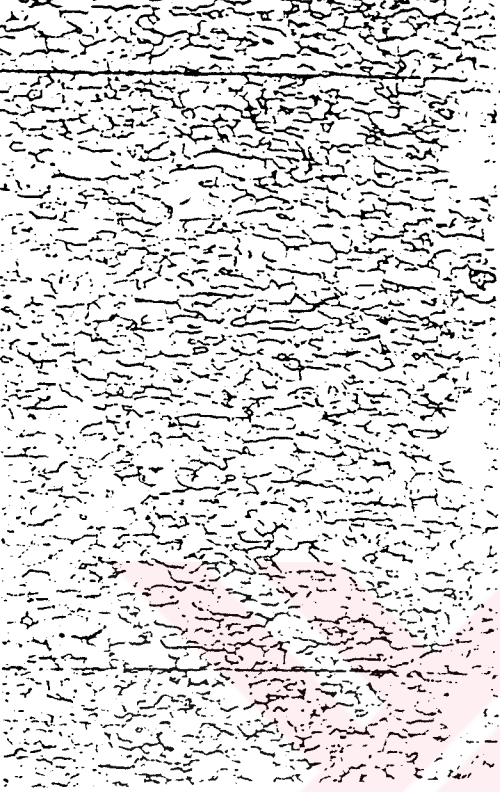
(ASM Handbook Committee, Vol 7)



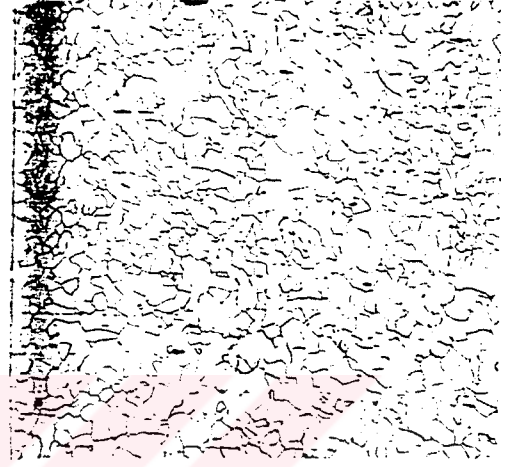
Şekil 5.47- Kaba ferrit tanesi



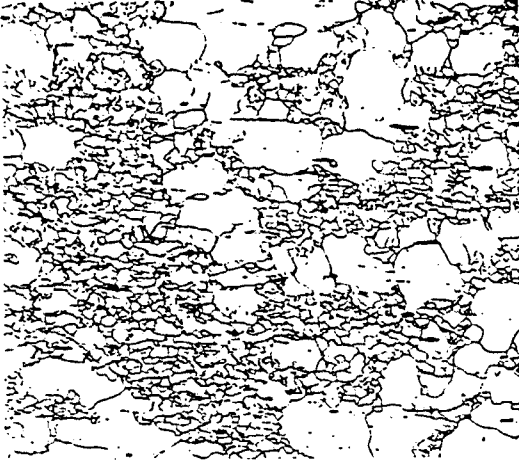
Şekil 5.48- Orta ferrit tanesi



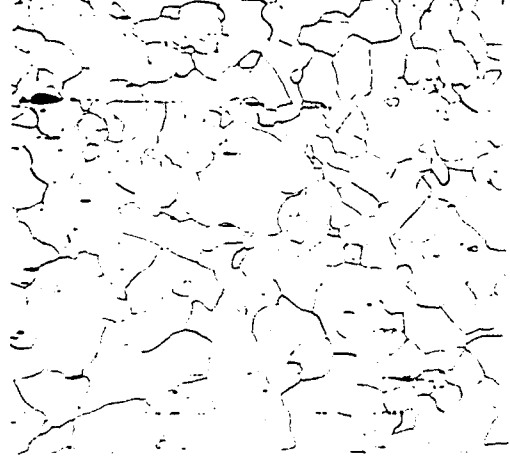
Şekil 5.49- İnce ferrit tanesi



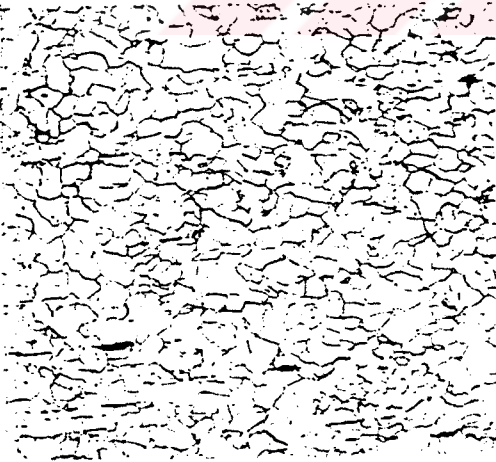
Şekil 5.50- Çemberli çelik,%0.013 C  
Bu çelik 938°C'de haddelenmiş ve  
727°C'de sarılmıştır. Bu seviyedeki  
bir sıcaklıkta haddelenmiş bir çelik  
için oldukça ince ferrit tanesi alışıla  
gelmiş değildir.



Şekil 5.51- 843°C'de haddelenmiş ve 893°C sıcaklıkta sarılmasının haricinde şekil 5.50 ile aynı özelliklere sahiptir.



Şekil 5.52- Çemberli çelik, % 0.012 C  
Bu çelik 821°C'de haddelenmiş ve 682°C'de sarılmıştır. Düşük bitirme işlemi sıcaklığında ortaya çıkan gerilim, haddeleme sıcaklığında tane büyümesini değiştirir.



Şekil 5.53- Çemberli çelik, % 0.06 C  
Bu çelik 843°C'de haddelenmiş ve 621°C'de sarılmıştır. İnce taneli ferrit oluşmuştur.



Şekil 5.54- Daha fazla büyütme ve kısmen tane sınırlarındaki sementit parçacıklarından oluşan karbür dağılımını gösterir. (Şekil 5.53 gibi)



Şekil 5.55- 788°C'de haddelenmesi şekil 5.53 ile aynı.Haddeleme sıcaklığı ince taneler ortaya çıkarmıştır.Kendi kendine tavlama yüzeyel tane büyümesine neden olmuştur



Şekil 5.56- Levhanın şekil değiştirme esnasındaki akma noktasının hemen üzerindeki gerilme altında şekil değiştirmesi sonucu olarak gerilme eğrileri bulunan çemberli 1008 çeliği.



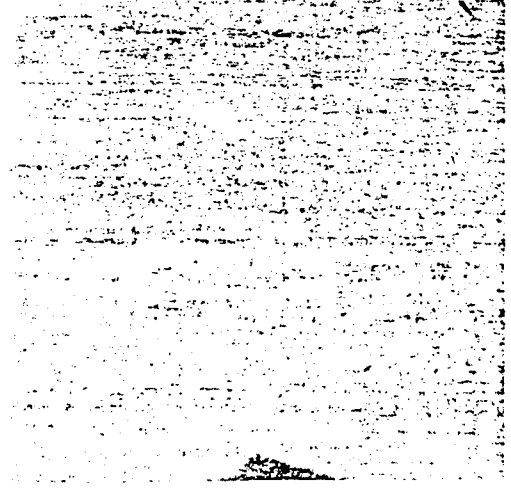
Şekil 5.57- Portakal kabuk adı verilen yüzey pürüzlülüğüne sahip levhadan oluşturulmuş çemberli 1008 çeliği.



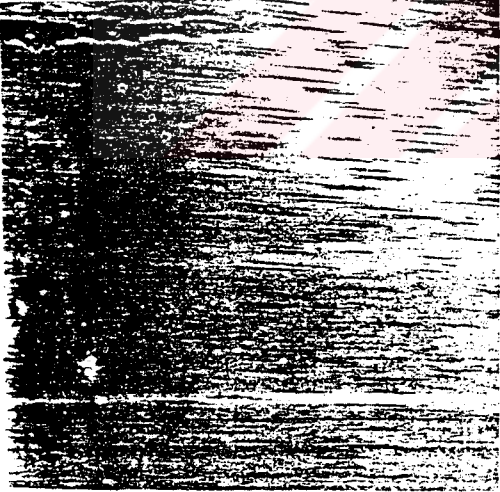
Şekil 5.58- Portakal kabuğa yol açan oldukça kaba yüzey tanesini gösterir. (Şekil 5.57 ile aynı,büyütülmüş kesit)



Şekil 5.59- Alüminyumca doymuş sıcak haddelenmiş 1008 çeliği. Çekilme işleminden sonra yüzeyde pul bir tabaka oluşur.



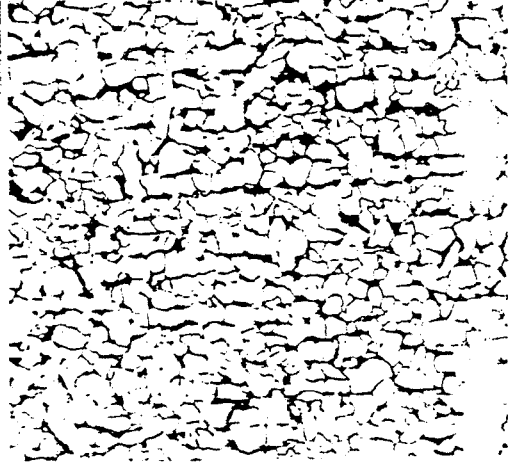
Şekil 5.60- Soğuk haddelenmiş 1008 çeliği levhası. Gösterilen yüzey hatası sıcak hadde de levhaya giren hadde cürufudur.



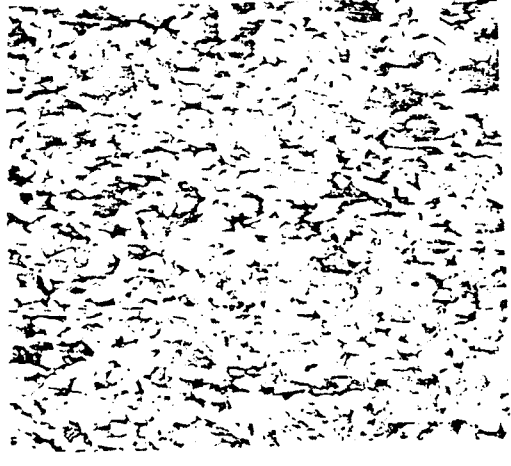
Şekil 5.61- Tandem haddesinde merdaneler arasındaki kaymalar nedeniyle yüzeyde boyuna damarlar oluşmuş, soğuk haddelenmiş 1008 çeliği.



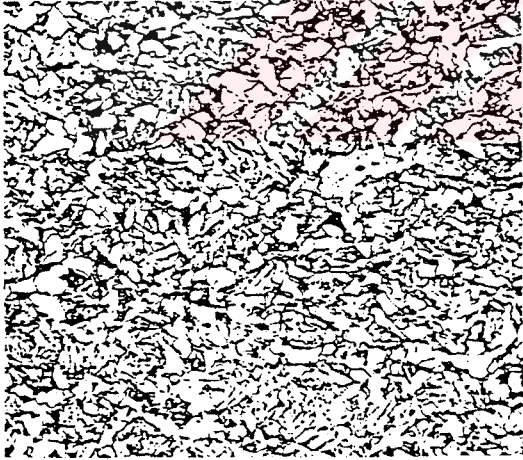
Şekil 5.62- Hafif bir zımparalamadan sonra yüzeydeki damar çok ince taneli bir oyuk oluşturur. (Şekil 5.61 ile aynı)



Şekil 5.63- ASTM A285 grade C.  
Çelik levha sıcak haddelenmiştir.  
(Özellikle sertleştirilmiş) Beyaz bölgeler  
ferrit,siyah bölgeler ise perlittir.



Şekil 5.64- ASTM A515,grade 70  
çelik levha. 1/4" kalınlığında,sıcak  
haddelenmiş konumda.Yapı,ferritten  
(açık bileşen) ve perlitten (koyu  
bileşen) oluşuyor. Tanelerin biraz



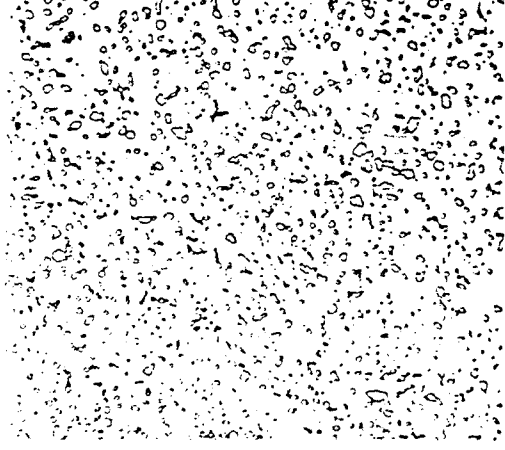
Şekil 5.65- ASTM A572 grade 65  
çelik levha.1/4"kalınlığında sıcak  
haddelenmiş. Mikroyapı ferrit ve perlit  
(koyu)den oluşuyor. Yapı içerisinde bir  
miktar beynitte görülüyor.



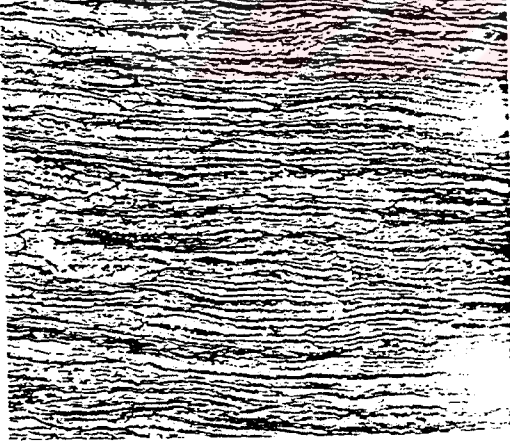
Şekil 5.66- Sıcak haddelenmiş 1060  
çeliği.1/4"çapında. Haddeme sonrası  
yüksek hızda hava üflenerek  
soğutulmuş yapı, büyük ölçüde  
çözülmemiş perlittir.Beyaz bölgeler  
Östenit tanelerini çevreleyen ferrittir.



Şekil 5.67- Sıcak haddelenmiş 1080 çeliği.1049°C'de yarım saat süre ile Östenitleştirilmiş ve fırında soğutulularak oda sıcaklığına getirilmiştir.Yapı az miktarda Sementit parçacıkları içeren perlittir.



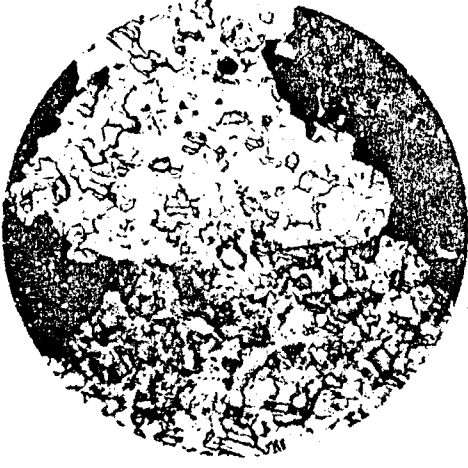
Şekil 5.68- Sıcak haddelenmiş 51B60 çelik çubuk.Martenzitik bir yapı elde etmek için Östenitleştirilmiş, su verilmiş sonra 15 saat süre ile 677°C ye kadar ısıtılmış. Yapı ,ferrit kalıbı içerisinde küresel karpit parçacıklarından oluşur.



Şekil 5.69- 301 tip paslanmaz çelik levha.% 40 büzölmeye kadar soğuk haddelenmiş , ağır deforme olmuş, Östenit tanelerinde martenzite dönüşümü gösteriyor.



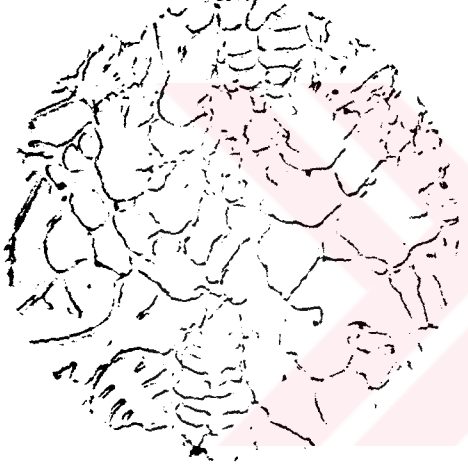
Şekil 5.70- Sıcak haddelenmiş,430 tipi paslanmaz çelik çubuk. Haddelene işlemine giren kısmın boyuna kesiti.Yapı dubleks ferrit ve martenzitten oluşur.



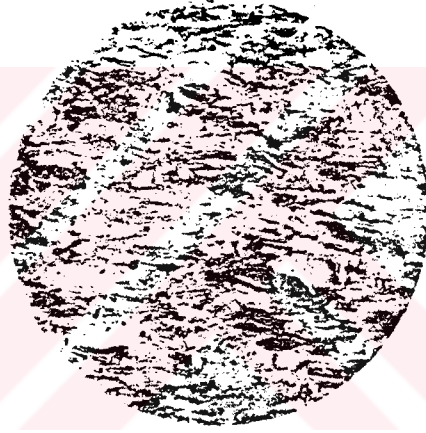
Şekil 5.71 Yüksek kaliteli çinko, büyük taneler içerisindeki orjinal tane sınırlarının gelişim şeklini gösteriyor.



Şekil 5.72 % 0.6 Cu, % 0.14 Ti içeren dökme çinko. Tane sınırlarında ötektik oluşmaktadır.



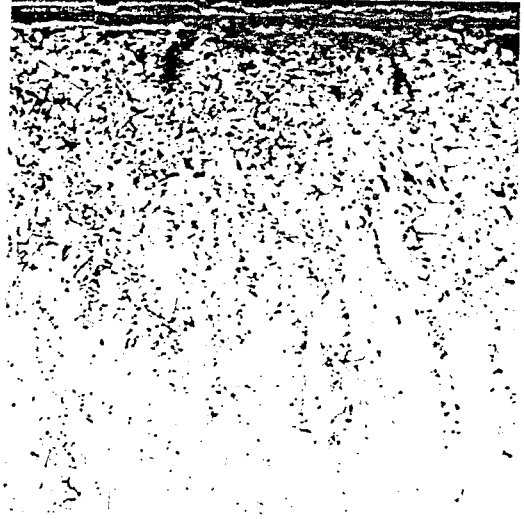
Şekil 5.73 % 1 bakır (haddelenme için) içeren çinko



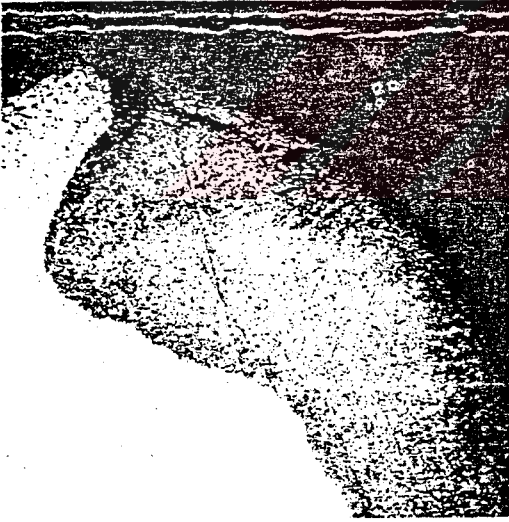
Şekil 5.74 Soğuk haddelenmiş % 1 bakır alaşımı. Taneler düzensiz yerleşmişler.



Şekil 5.75 Düşük kalaylı alüminyum alaşımlı çubuk çubuk kalay parçacıkları (uzatılmış) ve diğer temas çözünmeyen fazlar alüminyum içerisinde lekeler) görünüyorlar.



Şekil 5.76 Sıcak haddelenmiş bakır 110 Tel ingotun dökümü süresince havayla eden üst yüzeyde bakır oksit (koyu parçaları görünmektedir).

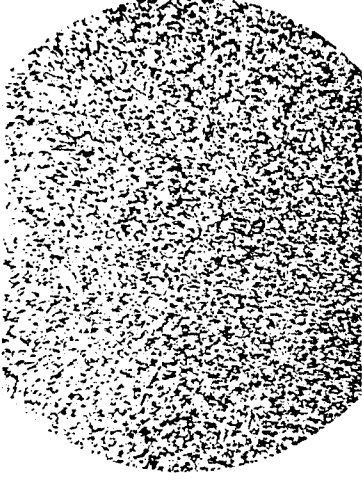


Şekil 5.77 Bakır 110 (elektrolitik bakır) teli sıcak haddeleme öncesi aşırı ısıtılmış tabakada çubuktan mamul. Yüzeyde haddelenebilme kabiliyetinde belirgin bir artışa yol açan büyük bakır oksit alanları oluşmuştur.



Şekil 5.78 Bakır 110 (elektrolitik bakır) Sıcak haddelenmiş çubuk. Yüzeyde deoksidasyon oluşmuş ve yüzeyde bakır oksit (koyu leke) görünmektedir.

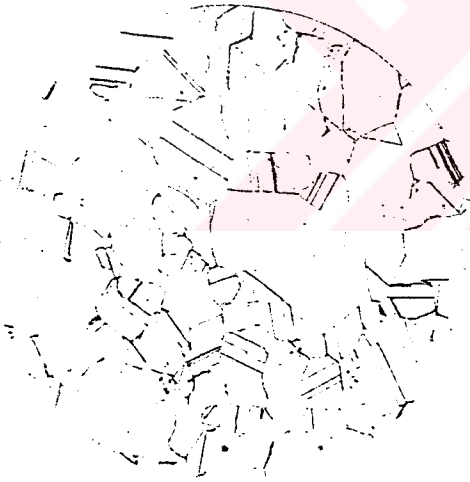
SOĞUK HADDELEMEDEN SONRA SERTLEŞTİRİLMİŞ 260 ALAŞIMININ TANE BOYUTLARI



Şekil 5.79 Tane boyutu 0.005 mm son sertleştirme son sertleştirme 325 °C



Şekil 5.80 Tane boyutu 0.025 mm son sertleştirme 446 °C

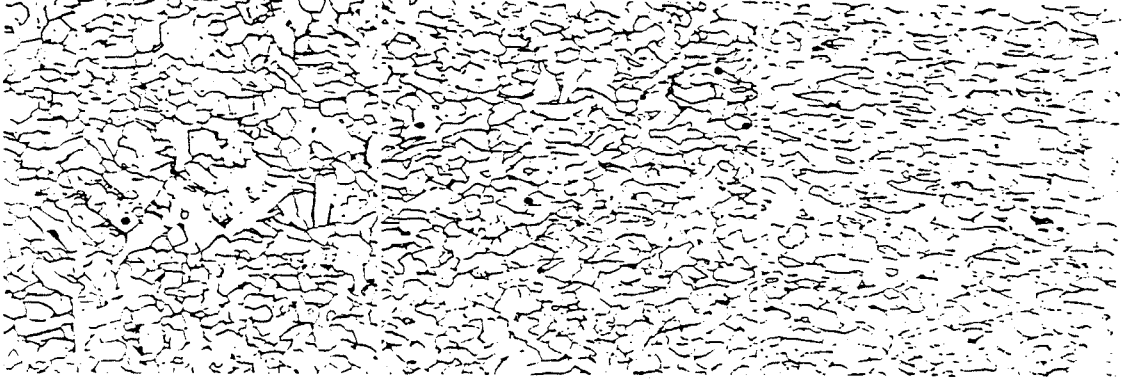


Şekil 5.81 Tane boyutu 0.1 mm son sertleştirme 607 °C



Şekil 5.82 Tane boyutu 0.2 mm son sertleştirme 704 °C

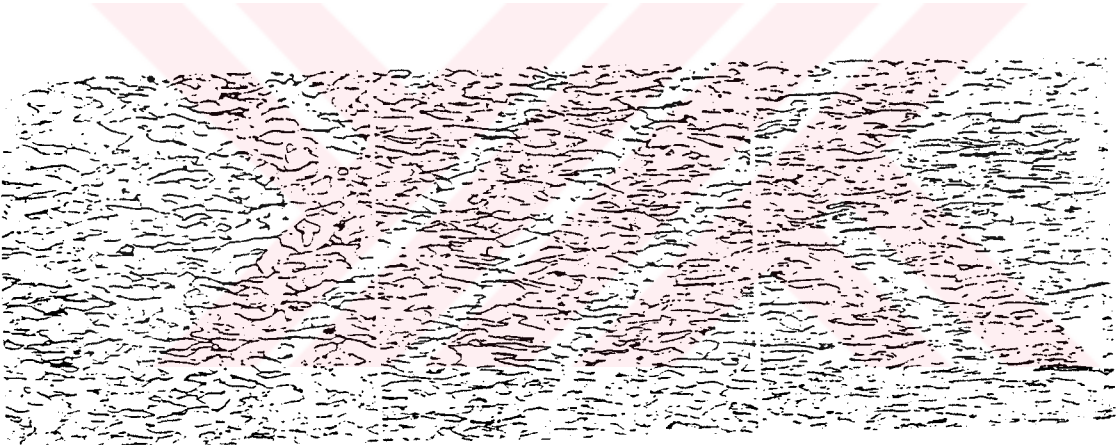
İZOLE EDİLMİŞ ÇELİĞİN SOĞUK HADDELENMESİNDE İNCELME YÜZDELERİNİN ETKİSİ



Şekil 5.83 % 10 İncelme

Şekil 5.84 % 20 İncelme

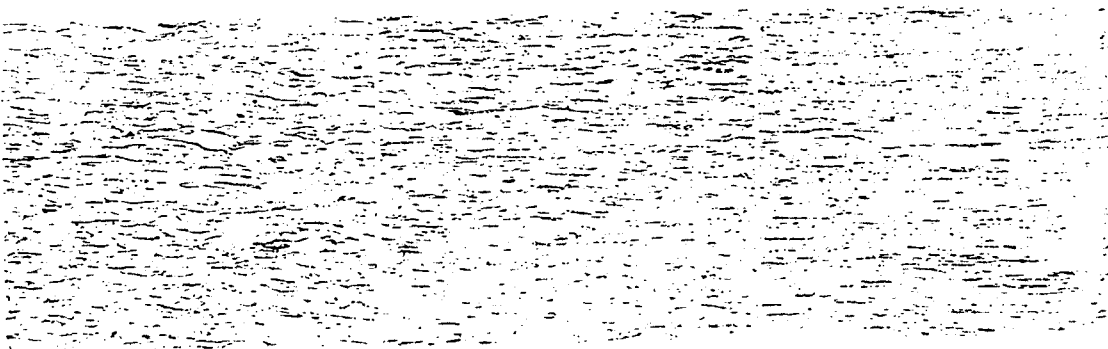
Şekil 5.85 % 30 İncelme



Şekil 5.86 % 40 İncelme

Şekil 5.87 % 50 İncelme

Şekil 5.88 % 60 İncelme



Şekil 5.89 % 70 İncelme

Şekil 5.90 % 80 İncelme

Şekil 5.91 % 90 İncelme

## SONUÇLAR

Katı çözeltilerin haddelenebilme kabiliyetleri ana elementin plastik özelliklerine göre belirlenir. Örneğin, ferro-nikel alaşımlarının haddelenebilme kabiliyetleri, demir ve nikelin her ikisinde iyi plastik özellikleri sahip olmalarından dolayı oldukça iyidir. Elementler katı çözelti içerisinde tam olarak çözülmedikleri takdirde plastisite azalır. Fakat tane içindeki ve tane sınırındaki kalıntılar olarak metal içerisinde kalıntı fazlarını oluştururlar. Saf maddelerin ve mikroskobik boyutta farklı element ilaveleri kullanılmasının, haddeleme işlemine etkileri olduğu gözönüne alınmalıdır.

Kristallerden oluşan malzemelerde; kristallerde tane sınırlarında kuvvetler dengesinin bozulması, kristaller içerisinde kuvvetler dengesinin bozulması ve bağımsız kristallerin parçalanması safhaları oluşur. Kristaller arası şekil değiştirme safhası düşük şekil değiştirme hızları ile yüksek sıcaklıklarda ortaya çıkmaktadır.

Metal numuneler üzerindeki çok sayıdaki gerilme testleri yüksek sıcaklıklarda ve farklı deformasyon koşullarında şu sonuçları ortaya çıkardı. Yüksek bir sıcaklık derecesinde (800 °C'nin üzerinde) maksimum gerilme ve orantılı limit değerleri deformasyona yol açan kuvvetler azaltıldığında çakışır. Deformasyona karşı direnç, deformasyon oranının artmasıyla artar. (Soğuk deformasyon durumunda deformasyonun etkisi oldukça düşüktür.)

Kalıcı bir şekil değiştirme sadece tane sınırlarında dengenin bozulması sureti ile meydana gelmemektedir. Bu denge bozulması bağımsız kristal tanelerinde tüm kesiti kapsamaktadır.

Haddelenebilme kabiliyeti düşük olan bir metalde deformasyonun üniform olmaması, sürekliliğin bozulmasına veya artık gerilmelerin oluşmasına yol açar.

Metaller yeniden kristalleşme ve erime sıcaklıkları arasındaki seviyelerde en iyi haddelenebilme kabiliyetine sahiptirler. Haddeleme başlangıcı ve sonu sıcaklıkları ; yumuşak karbon çeliklerinin çoğu için 950 ve 1260 °C, takım çelikler için 850 ve 1150 °C, orta karbon çelikler için 900 ve 1200 °C'dir.

Sıcak şekil değiştirme sıcaklıklarında aşırı fazlara sahip olmayan homojen katı çözelti biçimindeki metal iyi haddelenebilme kabiliyetine sahiptir. Aşırı fazlar, örneğin alfa fazı plastik özellikler üzerinde ters etkiye sahiptir. Isıtma esnasında aşırı fazların çözünmesi olasılığı gözönüne alınmalıdır. Çeliğin katı çözelti oluşturması için gerekli gerilme alfa fazı içeriğine bağlıdır.

Farklı karbon içeriğine sahip çeliklerin haddelenebilme kabiliyetleri karbonun kendisine nazaran daha çok dikkate alınır. Çeliğin karbon içeriği % 1.7'yi aşmadığı takdirde katı çözeltideki karbon, demir ile birlikte 1050 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda Ostenit oluşturur.

Karbon içeriği % 1.4'e kadar olan çeliğin haddelenebilme kabiliyeti demirinkine tekabül eder ve karbon içeriği % 1.4 - 1.7 aralığında olduğu zaman haddelenebilme kabiliyeti azalır. Çelikteki karbon miktarı % 1.7'nin üzerinde ise Ostenit'e ilaveten Ledeburit ve Sementit'de oluşur. Bu da haddelenebilme kabiliyetinde azalmaya neden olur.

Kükürt, Oksijen, Hidrojen ve Krom'un haddelenebilme kabiliyetine olumsuz etkisi vardır. Manganez, Silisyum, Fosfor, Nikel, Tungsten, Vanadyum ve Bor'un belirli oranlarında haddelenebilme kabiliyetine olumlu etkisi vardır.



## KAYNAKLAR

- 1- ASM Handbook Committee, Metals Handbook Vol.7, Ohio, 6-144
- 2- ASM Handbook Committee, Metals Handbook Vol.7, Ohio, 238-339
- 3- Burtsev, K, 1973, Rolling Practice, Moscow, 13-39, 49-86
- 4- Çapan, L, 1977, Plastik Şekil Verme Teori Ve Uygulamaları, İstanbul, 133-188
- 5- Tarnovski, I, 1965, Deformation Of Metals During Rolling, New York, 121-135
- 6- Wusatowski, İ.Z, 1963, Grundlangen des Walzens I, 1-113
- 7- Wusatowski, İ.Z, 1963, Grundlangen des Walzens II, 610-621
- 8- Yılmaz, M, 1988, Metallerin Haddelenmesi, TDÇİ İskenderun Demir Çelik Fab. 1;1-11, 4;4-12
- 9- Yurci, M.E, 1992-1993, Yüksek Lisans Ders Notları, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul
- 10- Yurci, M.E, 1992, Talaşsız Şekil Verme, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul
- 11- Lehnert, Wolfgang, Temmuz 1996, Makina Magazin, 38 - 42

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Ve Soyadı : Halil İbrahim DİKKANAT  
Doğum Tarihi : 29.06.1969  
Doğum Yeri : Sivas  
Mezun Olduğu İlk Okul : Reşat Şemsettin Sirer İlk Okulu, Sivas  
Mezun Olduğu Orta Okul : Danişment Gazi Orta Okulu, Sivas  
Mezun Olduğu Lise : Sivas Lisesi  
Mezun Olduğu Yüksek Okul : Yıldız Teknik Üniversitesi, 1987-1991

1991 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü İmal Usülleri Dalı Yüksek Lisans Bölümü'ne girdi. Halen bu bölümde Yüksek Lisans öğrencisidir.