

17491

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

Cd MONOKRİSTALİNDE KRİTİK MAKASLAMA ZORU (σ_k) DEĞERLERİ ve
KİMYASAL KUVVETİN HESAPLANMASI

T. C.
Yükseköğretim Kurulu
Dokümantasyon Merkezi

Nazım UÇAR

Yönetici : Prof. Dr. Y.Kemal YOĞURTÇU

Doktora Tezi

ÖZET

Bu çalışmada Kullanılan Kadmiyum % 99.99 saflıkta olup Fluka AG, Buchs (İsviçre) firmasından temin edilmiştir. Kristaller modifiye Bridgman metodu ile 10^{-3} torr'luk basınç altında büyütülmüş ve geri - yansımali Laue metodu ile yönlendirilmişlerdir.

Oda sıcaklığında büyüme doğrultuları boyunca çekme işlemine tabi tutulan ilk on kristalde oluşan kayma bantları, metal mikroskobu altında gözlenmiş ve kristallerin büyüme doğrultuları ile kayma bantları arasındaki açılar ölçülmüştür. Ölçülen bu açılar yardımıyla kristallerde $[\bar{1}\bar{1}23]$ ($10\bar{1}1$), $[11\bar{2}3]$ ($\bar{1}100$), $[2\bar{1}\bar{1}3]$ ($10\bar{1}1$), $[11\bar{2}0]$ (0001) kayma sistemlerinin aktif oldukları bulunmuştur. $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta çekme işlemine tabi tutulan 11 nolu kristalde $[2\bar{1}\bar{1}3]$ ($10\bar{1}1$), 60 ve $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıklarda çekme işlemine tabi tutulan 12 ve 13 nolu kristallerde $[\bar{1}\bar{1}23]$ ($11\bar{2}2$) kayma sistemlerinin ortaya çıktığı görülmüştür. Ayrıca kristallerin büyüme doğrultularının, kristallerde ortaya çıkan kayma sistemleri üzerinde etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır.

Oda sıcaklığında çekme işlemine tabi tutulan ilk on kristalde çekme - uzama eğrileri yardımıyla hesaplanan kritik makaslama zoru değerleri 4.2×10^6 - $7.3 \times 10^6\text{ Nm}^{-2}$ arasında değişirken, 11, 12, 13 nolu kristallerde kritik makaslama zoru değerleri sırasıyla 8.96×10^6 , 9.4×10^6 , $14.6 \times 10^6\text{ Nm}^{-2}$ olarak hesaplanmıştır.

Dağlama solüsyonu içinde büyüme doğrultuları boyunca çekilen 11, 12, 13 nolu kristallerin yüzeylerinde oluşan dağlama çukurcuk izlerinin fotoğrafları metal mikroskobu ile çekilmiş ve bu izlerin yardımıyla dislokasyonların ortalama hızları, 11 nolu kristalde $0.987 \times 10^{-6}\text{ ms}^{-1}$, 12 ve 13 nolu kristallerde ise 2.695×10^{-6} ve $3.273 \times 10^{-6}\text{ ms}^{-1}$ olarak hesaplanmış, sıcaklığın ve kritik makaslama zorunun artmasıyla dislokasyon hızında da bir artmanın meydana geldiği gözlenmiştir.

Büyütülen kristallerde tırmanma hareketi yapan 1 uzunluğundaki bir dislokasyon üzerine etkileyen kimyasal kuvvetin osmotik bileşeni için 0.01 - 1.43 Nm^{-1} , elastik bileşeni için ise 1.66×10^{-3} - $7.66 \times 10^{-3}\text{ Nm}^{-1}$ aralığında değişen değerler hesaplanmıştır. Bulunan bu değerler ışığında, tırmanma hareketinin sadece osmotik kuvvetten kaynaklandığının ve elastik kuvvetin tırmanma hareketinde bir etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır.

Tırmanma hareketi yapan bir dislokasyon parçası üzerine etkileyen ve osmotik kuvvet ile elastik kuvvetlerin toplamı şeklinde görülen kimyasal kuvvetin, sıcaklıktan bağımsız ancak artan noktasal kusur konsantrasyonundan etkilendiği sonucuna varılmıştır.

SUMMARY

99.99% pure Cd ingots are obtained from Fluka AG, Buchs (Switzerland). Crystals are grown by modified Bridgman method under 10^{-3} torr pressure and oriented by laue back reflection method.

The first ten crystals are pulled along growth direction at room temperature and formed slip bands are investigated under metal microscope and angles between growth directions and slip directions of crystals are measured. The slip systems $[\bar{1}\bar{1}23](10\bar{1}1)$, $[11\bar{2}3](\bar{1}100)$, $[2\bar{1}\bar{1}3](10\bar{1}1)$ and $[11\bar{2}0](0001)$ are found as operative slip systems by means of measured angles in these crystals. $[2\bar{1}\bar{1}3](10\bar{1}1)$ slip systems in crystals 11 which is pulled at 40C° and $[\bar{1}\bar{1}23](11\bar{2}2)$ slip systems in crystals 12, 13 which are pulled at 60C° , 80C° temperature respectively are found. In addition, It is found that these slip systems are not been effected by growth direction.

σ_k critic resolved shear stress of first ten crystals are found in range of 4.2×10^6 - 7.3×10^6 Nm^{-2} which are calculated by curves obtained from pulling experiment at room temperatures, critic resolved shear stress of crystals 11, 12, 13 are worked out as 8.96×10^6 , 9.6×10^6 and 14.6×10^6 Nm^{-2} .

Etch pits are photographed under the metal microscope and the mean dislocation velocities are calculated by means of traces as 0.987×10^{-6} , 2.695×10^{-6} and 3.273×10^{-6} ms^{-1} in crystals 11, 12, 13. It is seen that the mean dislocation velocity is increased with increasing temperature and critic resolved shear stress.

The osmotic force and the elastic force which are components of chemical force acting on dislocation unith length l made climbing motion are calculated in the range of 0.01 - 1.43 Nm^{-1} and 1.66×10^{-3} - 7.66×10^{-3} Nm^{-1} . It is seen that the driving force for climbing motion should be mainly osmotic force not be effected by elastic forces.


It is concluded that chemical force acting on dislocation which made climbing motion by a superposition of elastic force and osmotic force is indepented of temperature but effected from increasing point defects concentrations.

TEŞEKKÜR

Doktora tezi olarak sunduğum bu alışma Atatürk Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakóltesi Fizik Bölümü Öğretim Üyelerinden Prof.Dr.Y.Kemal YOĐURÇU'nun gözetiminde tamamlanmıştır. Çalışmalarım boyunca bana büyük destek olan sayın hocam Prof.Dr.Y.Kemal YOĐURÇU ve engin bilgi ve görüşleriyle büyük yardımlarını gördüğüm sayın hocam Yrd.Doç.Dr. Bahattin DÜZGÜN'e teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmalarımı tamamlamam için bana imkanlarını tahsis eden Fen-Edebiyat ve K.K.Eđitim Fakólterine de ayrıca teşekkür ederim.

Nazım UÇAR



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
SUMMARY	ii
TEŞEKKÜR	iii
1.GİRİŞ	1
2.TEORİ	6
2.1.Giriş	6
2.2.Kristal Yapısı	6
2.3.Kristal Kusurları	7
2.4.Dislokasyonlar	10
2.5.Burgers Çevrimi ve Burgers Vektörü	13
2.6.Dislokasyonların Hareketi	15
2.7.Kadmiyum Kristalinin Yapısı	17
2.8.Kadmiyum Monokristalinde Gözlenen Kayma Sistemleri	21
2.9.Dislokasyon Üzerine Etki Eden Kuvvetler	24
2.9.1.Uygulanan Dış Kuvvet Nedeniyle Dislokasyon Üzerine Etkiyen Elastik Kuvvet	24
2.9.2.Dislokasyon Üzerine Etkiyen Kimyasal Kuvvet	29
3. DENEYSEL İŞLEMLER	35
3.1.Giriş	35
3.2.Kristallerin Büyütülmesi	35
3.2.1.Bridgman Metodu İle Kristal Büyütme	35
3.2.2.Fırın Sistemi	36
3.2.3.Kristallerin Büyütülmesi	39
3.3.X-Işını Difraktometresi İle Kristal Resimlerinin Çekilmesi	39
3.4.Kristal Yönelimlerinin Tespiti	40
3.5.Kadmiyum Kristalinin Deformasyonu	41

3.5.1.Oda Sıcaklığında Çekme İle Deformasyon	41
3.5.2.Kristallerin Dağlanması ve Farklı Sıcaklıklarda Çekme İle Deformasyonu	43
4.DENEYSEL NETİCELER	45
4.1.Giriş	45
4.2.Etkili Kayma Sistemleri	45
4.3. σ_k Makaslama Zoruun Kritik Değerleri ve Schmid Çarpanları	47
4.4.Fotoğrafik Büyütme	50
4.5.Kadmiyum Kristalinde Dağlama Çukurcuklarının Oluşumu ve Dislokasyon Hızlarının Hesaplanması	50
4.6.Dislokasyon Üzerine Etki Eden Kimyasal Kuvvetin Hesaplanması	53
5.TARTIŞMA	59
6.EK AÇIKLAMALAR	65
7.KAYNAKLAR	67

1. GİRİŞ

1912 yılında Laue'nin x-ışını difraksiyonu üzerindeki çalışmaları ile metallerin kristal yapıya sahip oldukları anlaşıldı ve böylece kristal yapı özellikleri deneysel olarak incelenme imkanı ortaya çıktı. 1930 lu yıllarda Born ve diğer araştırmacılar mükemmel kristal teorisini geliştirdiler¹. Ancak bu teori, kristalleşmiş cisimlerin plastik deformasyon, yeniden kristalleşme, kopma, elektriksel iletkenlik, yarı iletkenlik gibi yapıya has bazı özelliklerini açıklayamadı. Bu çalışmada bizi özellikle ilgilendiren plastik deformasyonu gözönüne alırsak, karşılaşılan güçlüklerden biri, mükemmel teorisinden gidilerek hesaplanan malzemenin plastik deformasyona başlaması için gerekli gerilme (malzemenin teorik mukavemeti) ile laboratuvarında ölçülen gerçek mukavemeti arasında farkın bulunması idi. Aradaki farkın, kristalin mükemmel olmamasından ileri geldiği düşünülerek, bir kısmı hipotez olmak üzere, çeşitli kristal kusurlarına dayanan teoriler ileri sürüldü. Nihayet 1934 yılında, birbirinden bağımsız olarak Orawan, Taylor ve Polanyi dislokasyon denen lineer kristal kusurlarının, kristallerin teorik ve gerçek mukavemetleri arasındaki farkı izah edebileceğini ileri sürdüler². Böylece kristal plastisitesinin anlaşılması yolunda en önemli adım atılmış oldu.

Dislokasyon kavramı, 1934 yılında tamamen teorik olarak kristallerin plastik deformasyonuna tatbik edilmekle birlikte, 1953 yılına kadar dislokasyonların mevcudiyet ve davranışları hakkındaki bilgiler hep dolaylı yollarla elde edilmiş ve ilk kez 1953 yılında, şeffaf iyonik kristallerde dislokasyonlar, dekorasyon tekniği ile gözlenmiştir. Bugün diğer gözleme tekniklerinin de geliştirilmesi ile dislokasyonlar teorik mevhumlar olmaktan çıkmış ve malzemelerin mekanik özelliklerini tayin eden unsurlar olarak bilim dünyasında gereken önemi kazanmışlardır.

Plastik deformasyona neden olan ferdi dislokasyonları gözleme teknikleri dört ana grupta toplanır³. Bunlardan yüzey metodu, kristal yüzeylerinin dağlanması sonucu, kristal yüzeylerinde ortaya çıkan dağlama tepesi veya dağlama çukurcuklarının araştırılması esasına dayanır. Dağlama çukurcuklarının dislokasyonlara uygunluğu ilk kez 1949 yılında Chockley ve Read⁴ tarafından teklif edilmiş ve 1957 yılında Batterman⁵ dağlama tepesi ile çalışmalar yapmıştır. Bu metodta, çukurcuk yada tepelikler dislokasyonlara birebir karşılık gelmektedir. X-ışını topoğrafı ise, x-ışınlarının kristalden saçılması sonucunda oluşan saçılma deseni üzerinde, dislokasyon bulunan yerlerdeki mahalli farklılıkların araştırılmasıdır. İlk kez Hedges ve Mitchell³ tarafından kullanılan dekorasyon tekniği ise, bulk kristallerden ışık geçirilerek dislokasyonların araştırılması

esasına dayanır. Çok ince numuneler gerektiren (0.1-1 μ) elektron mikroskobu ile de dislokasyonların hareketlerini belirgin olarak gözlemek mümkün olmaktadır.

Plastik deformasyonla ilgili çalışmalar ilk kez Elam⁶, Schmid ve Boas⁷ tarafından başlatılmıştır. Adı geçen araştırmacıların çalışmaları, kristallerin mukavemetlerinin ölçümü ve kayma bandlarının ortaya çıkarılması üzerine olmuştur. Yapılan kaynak araştırmaları, Cd kristali ile ilgili çalışmaların 1950 yılında Bilby⁸ ile başladığını göstermektedir. Bilby, Cd kristalinde, deforme olmuş tabakalar arasındaki kalınlığın deformasyon şartları ile değiştiğini ancak kalınlığın 10^{-3} - 10^{-4} cm arasında kaldığını bulmuştur. Aynı yıllarda Mackenzie⁹, Cd ve Mg kristallerinde, teorik olarak hesapladığı kritik makaslama zoru ile Gleen¹⁰ in yine aynı kristaller üzerinde deneysel olarak hesapladığı kritik makaslama zoru arasındaki fark, mükemmel kristal kabulenimi yanında, toplam kaymanın tüm kristal yüzeyi boyunca ortaya çıkması gerçeği ile açıklanmıştır.

Kayma türündeki kristal yapı bozukluğunun hangi düzlemler üzerinde ve hangi doğrultular boyunca meydana gelebileceği üzerindeki çalışmalar Frank¹¹ tarafından başlatılmıştır. Frank, kayma doğrultusu ve kayma düzleminin oluşmasında kayan dislokasyonların Burgers vektörü ile ilgili olduğunu bulmuştur. Daha sonra geliştirilen dislokasyon teorisine göre, düşük indisli kayma düzlemlerinin ve en küçük büyüklüğe sahip Burgers vektörünün en az Pierls zoruna maruz kaldıkları ve dolayısıyla bu düzlem ve doğrultular boyunca kaymanın daha sık ortaya çıktığı gösterilmiştir. Bu düzlem ve doğrultular sıkı paketlenmiş hekzagonal (hcp) kristallerde, kayma düzlemi olarak (0001) basal düzlem ve kayma doğrultusu olarak $[11\bar{2}0]$ doğrultusu bulunmuştur. Ancak Tyapunina et al.¹², Hyaguji et al.¹³ ve Seeger⁹ gibi birçok araştırmacı, hekzagonal kristallerde bu düzlem ve doğrultular dışında da başka düzlemler ve doğrultular boyunca da kaymanın meydana geldiğini göstermişlerdir.

Dislokasyonların kayma hareketi esnasındaki hızlarının ölçümü için direkt bir metod 1959 yılında Jonston ve Gilman tarafından geliştirilmiştir¹⁴. Sözü edilen araştırmacılar, deformasyonun değişik basamaklarında ölçtükleri dislokasyon hızlarını 10^{-3} - 10^{-9} ms⁻¹ aralığında bulmuşlardır. Honda et al.¹⁵ dağlama tepesi izinden hareketle Sn kristali için ortalama dislokasyon hızını 10^{-7} ms⁻¹ mertebesinde bulmuşlar ve dağlama izlerinden hareketle dislokasyonların yönlerinde belirlenebileceğini göstermişlerdir.

Dislokasyonların diğerk kristal kusurları ile etkileşmeleri konusunda çeşitli araştırmacıların dikkatini çekmiştir. Kocks¹⁶, Foreman ve Makin¹⁷ tarafından Sn kristali üzerinde üzerinde yapılan çalışmalarda, kayma düzlemine rastgele dağılmış noktasal kusurlarla karşılaşan dislokasyonların hareketi ayrıntılı bir biçimde araştırılmıştır. Marukawa¹⁸ da yine aynı kristal üzerinde yaptığı çalışmada, dislokasyon hareketine, kitlenmiş dislokasyonlar ile boş köşeler ve ara yer atomlarının basamaklar meydana getirerek, bir engel teşkil ettiklerini dolayısıyla kristalin akma mukavemetinin yükselmesine, sertleşmeye neden olduklarını göstermiştir. Benzer bir çalışma Düzgün¹⁹ tarafından β -Sn kristali üzerinde 1985 yılında yapılmıştır. Düzgün, dislokasyon-noktasal kusur etkileşmesi sonucu σ_k kritik makaslama zoru değerinin arttığını göstermiştir. Ayrıca, kristallere zor uygulandığında, su verme işlemine tabi tutulan kristallerde oluşan noktasal kusurların dislokasyonlarla etkileşmesi sonucu, dislokasyon yoğunluğu oldukça büyük bandlar gözlemiş, noktasal kusur içeren su verme işlemine tabi tutulmuş kristallerde σ_k kritik makaslama zoru değerlerini, su verme işlemine tabi tutulmayan kristaller için bulunan değerlere nazaran daha büyük değerlere ulaştığını göstermiştir. Walukevicz²⁰ de 1989 yılında In ile katkılanmış GaAs kristali üzerinde yaptığı bir dizi çalışmada, izoelektronik ve elektriksel aktif kirlilikler ile katkılanırlan yarı iletkenlerde dislokasyon yoğunluğunun düşürülebileceğini bu durumun kristalin kritik makaslama zoru üzerinde bir değişikliğe yol açmayacağını belirtmiştir.

Mott²¹, 1951 yılında kenar dislokasyonunun kayma düzleminin dışına ve kayma düzlemine dik olarakta hareket ettiğini ortaya atmış ve bu hareketin ancak noktasal kusurların dislokasyon çizgisinde oluşmaları veya yokedilmeleri ile mümkün olabileceğini belirtmiş ve bu harekete tırmanma hareketi adını vermiştir.

Tırmanma hareketi yapan dislokasyonlar üzerine noktasal kusurlar tarafından uygulanan kuvvet ile ilgili ilk teorik hesaplamalar Bardeen ve Herring²² tarafından yapılmıştır. Adı geçen araştırmacılar, tırmanma hareketinin atom veya boşlukların hareketleri ile meydana geldiğinden, bu hareketin olabilmesi için yüksek sıcaklıklar ve aşırı boşluk konsantrasyonunun varolması gerektiğini vurgulamışlar ve bu kuvvetin adına osmotik kuvvet adını vermişlerdir.. Tibault-Desseaux et al.²³, 1989 yılında Silikon kristali üzerinde yaptıkları çalışmalarında, tırmanma hareketi esnasında yığın kusurlarının oluştuğunu göstermişler ayrıca tırmanma hareketi esnasında, noktasal kusurlar tarafından dislokasyon üzerine uygulanan ve osmotik kuvvet adı verilen bu kuvvet üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Uygulanan dış kuvvetin dislokasyon üzerine etki ettirdiği elastik

kuvvetlerle ilgili çalışmalara çok yoğun olarak rastlanmakla birlikte, noktasal kusurların dislokasyon üzerine uyguladıkları osmotik kuvvet ile ilgili çalışmalara oldukça az rastlanmaktadır. Özellikle metal kristallerde bu kuvvetle ilgili deneysel bir çalışmaya rastlanılmamış ancak yarı iletkenlerde osmotik kuvvet ile ilgili çalışmaların, noktasal kusur-dislokasyon etkileşmesinin yarı iletken devrelerin performans ve nitelikleri üzerine etkilerinden dolayı hız kazandığı gözlenmiştir.

Wagner et al.²⁴, deforme olmuş GaP yarı iletkeni üzerinde transmission elektron mikroskobu ile yaptıkları çalışmalarında, kenar dislokasyonlarının hareketlerini ayrıntılı biçimde gözlemişler, hangi tür noktasal kusurların tırmanma hareketi için aktif olduklarını araştırmışlardır. Aynı araştırmacılar l uzunluğundaki bir dislokasyon parçası üzerine noktasal kusurlar tarafından uygulanan osmotik kuvveti $0.19-3.2 \text{ Nm}^{-1}$ mertebesinde, dış kuvvetlerin l uzunluğundaki bir dislokasyon parçasına uyguladığı elastik kuvvetide 0.02 Nm^{-1} mertebesinde bulmuşlar ve dislokasyona tırmanma hareketi yaptıran kuvvetin osmotik kuvvet olduğunu belirtmişlerdir.

Hirth ve Lothe²⁵, 1982 yılında tırmanma hareketi yapan düz bir dislokasyon üzerine etkiyen kuvveti, noktasal kusurlardan kaynaklanan osmotik kuvvet ve dış zorlardan kaynaklanan elastik kuvvetin toplamı şeklinde göstermişlerdir. Wertmann²⁶, gerek osmotik gerekse elastik kuvvetin aynı doğrultuda olduklarını, aynı zamanda bu kuvvetlerin dislokasyon çizgisine dik olduklarını belirtmiş ve bu kuvvetlerin toplamına kimyasal kuvvet adını vermiştir.

Tüm kristallerde var olan dislokasyonların, gerek metallerin gerekse yarı iletkenlerin elektriksel özellikleri üzerinde büyük etkileri vardır. Ayrıca kristal yapı içinde yapının zayıflık merkezleri olarak bilinen dislokasyonların, özellikle malzeme hazırlanmasında, yoğunluk, hız ve kristal içindeki davranışlarının bilinmesi gerekmektedir. Bu çalışmanın amacı, Cd monokristallerinde kayma sistemleri, kritik makaslama zoru (σ_K) değerlerinin araştırılması ve kimyasal kuvvetin hesaplanmasına yöneliktir.

Çalışmada modifiye Bridgman metodu ile büyütülen Cd kristalleri, büyüme doğrultuları boyunca çekme işlemine tabi tutulmuş, oda sıcaklığında çekme işlemine tabi tutulan 1, 2, 3,...,10 ve 40, 60, 80 C° sıcaklıklarda çekme işlemine tabi tutulan 11, 12, 13 nolu kristallerde kayma sistemleri tesbit edilerek, sıcaklığın kayma sistemleri üzerine etkisine bakılmış ayrıca çekme-uzama eğrilerinden yararlanarak kristaller için hesaplanan kritik makaslama zorunun ve dağılama sonucu kristal yüzeylerinde oluşan dağılama çukurcuk izlerinden hareketle hesaplanan ortalama dislokasyon izlerinin sıcaklığa bağımlılığı

araştırılmıştır. Kayma sistemlerinden hareketle kristaller üzerinde osmotik kuvvet için $0.01-1.43 \text{ Nm}^{-1}$, elastik kuvvet için $1.66 \times 10^{-3}-7.66 \times 10^{-3} \text{ Nm}^{-1}$ değerleri hesaplanmış ve dislokasyon üzerine tırmanma hareketi esnasında etkiyen kimyasal kuvvete, elastik kuvvetin bir katkısının olmadığı sonucuna varılmıştır.

Bu alışma beş bölümden oluşmakta olup, II. bölümde konu ile ilgili geniş teorik açıklamalara yer verilmiştir. III. bölümde kullanılan sistem ve metod açıklanmış ve elde edilen sonuçlar IV. bölümde verilmiştir. V. bölüm ise elde edilen sonuçların tartışılmasına ayrılmıştır.



2. TEORİ

2.1. Giriş

Kristoloğraflar ve minerolojistler yıllar boyu kristal yapılar hakkında çeşitli bilgiler toplamışlar ve çeşitli deneyler yapmışlardır. İlk bilgiler, kristallerin özdeş yapı bloklarının periyodik olarak tekrarı ile meydana geldikleri sonucuna götürmüştür. Bir madde kristalleştiğinde, sanki kendisine sürekli olarak özdeş yapı blokları ekleniyormuşcasına şekli değişmez kalır. Bu yapı blokları atom yada atom gruplarından meydana gelir. Bu yüzden katı hal fiziği, biraraya gelmiş atomların özellikleri ile ilgilidir. Katı içindeki bir tek atomun özellikleri şüphesiz katının özelliklerini tayin etmede çok önemlidir ancak, bazı özellikler vardırki (elektriksel iletkenlik, ferromagnetizma) katı için bir mana ifade ederken, bir tek atom için hiç bir anlam taşımazlar. Katı içinde konumlarını değiştirmiş atomlarının oluşturduğu bir çizgi olarak düşünülen dislokasyonlarda, gerek özellikleri gerekse davranışları göz önüne alındığında katının pek çok özelliğinin tayin edilmesinde önemli bir yer tutarlar.

2.2. Kristal Yapısı

Bir kristal, atom yada atom gruplarının üç boyutlu uzayda periyodik olarak dizilmelerinden meydana gelmiş katı cisimler olarak tanımlanır^(1,3,27). Kristal yapıda dikkati hemen dikkati çeken özellik simetridir. Bir kristal gözönüne alındığında, atomların yada atom gruplarının yerleşiminde bu simetri özelliği açıkça ortaya çıkar. Bu yüzden bir kristal, gazlardan ve sıvılardan esaslı biçimde farklıdır. Çünkü sıvı ve gazlarda atom yada atom grupları arasında periyodiklik olmadığından, simetri özelliğide yoktur. Bununla beraber bütün katılarda kristal değildir. Cam gibi bazı katılar amorf olup atomların periyodik düzenlenmesi söz konusu değildir. Bir sıvı soğutulursa, alçak sıcaklıklarda katılaşıp ve belli bir şekle ve hacime sahip olabilir. Bu şekilde ortaya çıkan katıda bazı kristoloğrafik özellikler gözlenirse, bu tür katıların amorf yapıda da olabilecekleri gözden uzak tutulmamalıdır. Gerçekte amorf bir katı ile sıvı arasında esaslı bir fark olmayıp yeğane fark vizkoziteleri arasındadır.

Kristallerde gözlenen simetri özelliğinden dolayı, amorf yapılardan farklı olarak, bir dış zorun etkisi altında kristalin zora karşı gösterdiği direnç doğrultuya bağlı olarak değişir. Benzer olarak, kristallerin fiziksel özelliklerinin doğrultuya bağımlı olması nedeniyle, elektriksel direnç, ısı iletimi ve optik özelliklerde doğrultuya bağımlıdır. Bu özellikler

kristallerde, kristalin ilk oluşumu sırasında ortaya çıkar. Eğer kristal ilk oluşumu sırasında bir dış fiziksel zora uğramıyorsa, iç atomik yapısına bağlı olacak şekilde bir dış görünüm ortaya koyar ki, bu dış görünüş pek çok özelliğinin belirlenmesinde önemli bir rol oynar.

Kristalin tanımı yapılırken, üç boyutta kendini tekrar eden belirli bir atomik düzenden bahsedilmesine rağmen, tabiatta mükemmel kristal bulmak zordur. Kristalin fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerine büyük etkileri olan ve kristal yapıdaki periyodikliği bozan kusurlar bulunur. Bu kusurların miktar, dağılım ve davranışlarının kristal içinde bilinmesi büyük önem taşır.

2.3. Kristal Kusurları

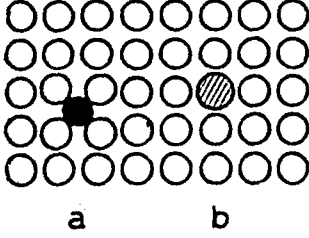
Mükemmel kristal, atomların üç boyutta periyodik tekrarı ile meydana gelir. Her atomun yanı doludur ve atom düzlemlerinin düzenlenmesinde periyodikliği bozan bir durum yoktur. Bu mükemmel kristalin fiziksel ve kimyasal özellikleri, atomların yapısına ve atomik bağlanmanın tabiatına bağlıdır.

Tüm gerçek kristaller kusur ihtiva ederler. Bu kusurlar atomların kristal yapı içindeki periyodik düzenini az yada çok değiştirirler. Bu değişim, kristallerin bazı özelliklerinin tayin edilmesinde büyük önem taşır. Mesela, metallerdeki elektriksel iletkenliğe katkıda bulunan serbest elektronların hareketlerini değiştirebilirler.

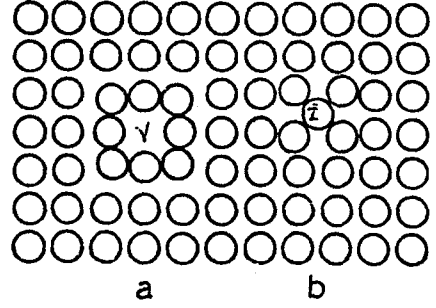
Kristali oluşturan atomlar arasında yer almış yabancı atomlar (safsızlık atomları) , yani kristal yapı içinde bulunmaması gereken atomlarda kristal yapıdaki periyodikliği az yada çok değiştirirler. Bu durum şekil 2.1. a ve b de gösterilmiştir. Bunlarda bir kusur olup, kristallerin tanımlanan mükemmel halde olmadıklarını gösterir.

Belirli bir atom yada atom gruplarından oluşan bir kristalde, atomlar arası düzenin bozulduğu haller notasal, hacimsel, çizgisel (dislokasyonlar) kusurlar olarak adlandırılır.

Noktasal kusurlar, kristal yapı içinde bir atomun bulunması gereken bir noktada bulunmaması yada bulunmaması gereken bir noktada fazladan bulunmasıdır. Birinci tip "vacany" olarak adlandırılan atomik boşluk, ikincisi ise "interstial" adı verilen atom dizileri arasına yerleşmiş bir arayer atomunun sebep olduğu noktasal kusurdur (Şekil 2.2. a ve b).



Şekil 2.1. Safsızlık atomlarından kaynaklanan noktasal kusurlar.



Şekil 2.2. Boşluk ve ara yerde bulunan atom.

Boşluklar, yüzeylerde, tane sınırlarında ve dislokasyon çizgisinde oluşturulabilirler. Atomların bazıları geride atomik boşluklar bırakarak yüzeye tane sınırına sıçrayarak Schottky, atomların bazıları da kristal içinde bazı ara yerlere geçerek hem boşluk hemde arayer kusurunu birlikte oluşturarak Frenkel kusuru denilen noktasal kusurları meydana getirirler (Şekil 2.3. a ve b).



Şekil 2.3. a) Schottky kusuru, b) Frenkel kusuru.

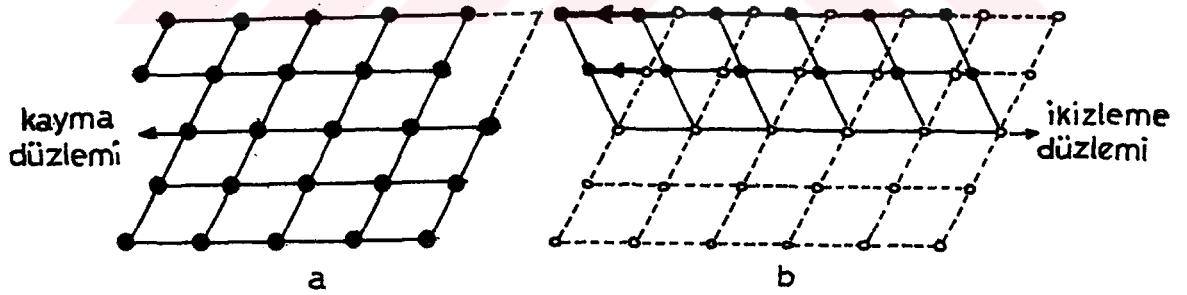
Burada sözü edilen kristal yapı kusurları, maddenin kristalleşmesi esnasında ortaya çıkmış olabileceği gibi, daha sonra dış etkenlerle, plastik deformasyon, yüksek enerjili parçacıklarla ışınlama ve kristalin yüksek sıcaklıklardan aniden soğutulmasıyla da oluşturulabilirler.

Noktasal kusurlar, kristal yapı içinde atomlar arası mesafenin birkaç katı mertebesinde olup, elastik zorlanmalardan bağımsız kusurlardır. Noktasal kusur, atomik boşluk olarak alınırsa, T sıcaklığında bir metal içindeki boşlukların sayısı n ve örgüdeki atomların sayısı N ise n/N oranı,

$$n/N = A \exp(-E_f/kT) \quad (2.1)$$

ifadesi ile verilir. Burada E_f , bir boşluğun ortaya çıkması için gereken enerji, k Boltzman sabiti, A entropi terimi T ise sıcaklıktır. İfadeden de anlaşılacağı üzere boşlukların sayısı sıcaklıkla artar. Metal kristallerde $E_f \approx 1\text{eV}$ civarında olup, erime noktası civarında n/N oranı 10^{-4} - 10^{-5} mertebesindedir²⁷.

Kristallerde gözlenen hacimsel yapı bozukluklarından en çok görülen iki türü kayma ve ikizlemedir^(3,27). Kayma, kristali oluşturan atomik düzen bozulmaksızın, kristalin iki bölümünün kayma düzlemi adı verilen bir düzlem üzerinde ve atomik uzaklıklar düzeyinde, birbirlerine göre kaymaları şeklinde ortaya çıkar (Şek 2.4.a). Kayma esnasında ortaya çıkan atomik yer değiştirmede yer değiştirme mesafesi, atomlar arasındaki mesafenin tam katlarıdır. İkizleme ise, kristalin bir bölümünün diğerine göre hacimsel olarak yer değiştirmesi ile ortaya çıkar. Yer değiştirme, atomlar arası mesafenin tam katları değildir. Bu kusur tipinde ikizleme düzleminin alt ve üstündeki atomik düzen korunmakla birlikte, ikizleme düzleminin alt ve üstündeki kristal düzlemleri birbirlerine göre belli bir açı altında dönmüşlerdir (Şekil 2.4.b).



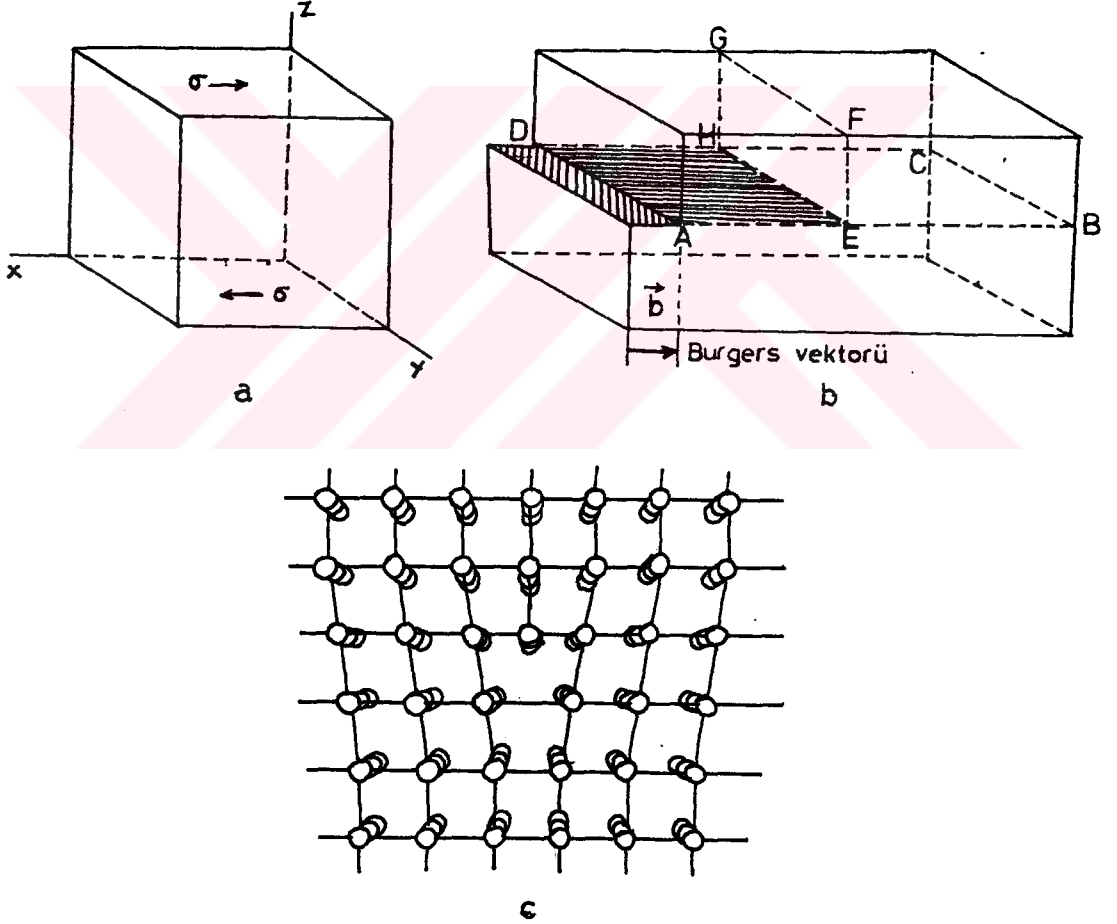
Şekil 2.4. a) Kayma, b) İkizleme türü hacimsel kusurlar.

Bir kristal yapı içinde ortaya çıkan kayma ve ikizleme türü yapı bozuklukları, üzerinde oluştukları düzlem ve oluş doğrultuları ile belirtilirler. Aslında bu tür hacimsel yapı bozuklukları oluşum özellikleri dikkate alınırca, gelişigüzel bir düzlem üzerinde ve doğrultu boyunca ortaya çıkmayacakları görülür²⁷. Kristal yapıda gözlenen hacimsel türdeki bozukluklar, çizgisel kusurlarla (dislokasyonlar) ilede yakından ilgilidir. Mesela kayma türündeki hacimsel yapı kusuru her zaman bir dislokasyonun oluşumuna neden olur.

2.4. Dislokasyonlar

Kristal içinde çizgisel yapı kusurları olarak bilinen dislokasyonlar, örgü içinde oldukça uzun atomik boyutlarda ortaya çıkarlar. Kristalin mekanik özellikleri üzerinde büyük değişikliklere yol açan dislokasyonlar, yapının zayıflık merkezleri olarak bilinip, bir kristalin kırılabilirliğini 10^4 kat artırabilirler.

Dislokasyon, kristal yapı içinde konumlarını değiştirmiş atomların oluşturduğu bir çizgi olarak tarif edilebilir²⁷. Şekil 2.5. de Orawan, Taylor ve Polanyi nin ileri sürdüğü bir kenar dislokasyonu adı verilen bir dislokasyon tipi ile kayma olayının nasıl gerçekleştiği görülmektedir²⁵.



Şekil 2.5. a) ve b) Makaslama zoru tesirinde kenar dislokasyonunun oluşumu, c) Basit kübik yapıda kenar dislokasyonunun görünüşü.

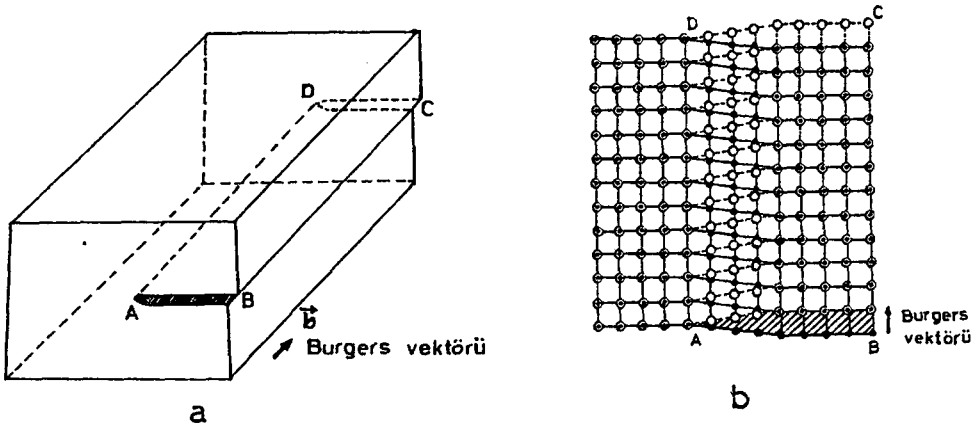
Şekil 2.5.a daki kristal alt ve üst yüzeyine etkiyen makaslama zoru tesirinde, şekil 2.5.b de görüldüğü gibi, kristalin ABCD kayma düzlemi üzerindeki kısmı, kayma düzleminin

altında kalan kristal kısmına nazaran \vec{b} doğrultusunda b kadar kaymıştır. Kayma henüz tamamlanmadığı için, kayma düzlemi üzerinde EFGH fazladan yarı düzlemi oluşmuştur. Fazladan yarı düzlemin kristalin kayma düzlemi üzerindeki izine kenar dislokasyonu denir. Esasında burada yapılan tarif genel olup, kayma düzlemi üzerinde kaymış ve kaymamış bölgeleri ayıran sınır çizgiye, şekli ve doğrultusu ne olursa olsun dislokasyon denir^(1,2,3,26,27). Şekil 2.5.b de EH kenar dislokasyonu, fazla yarı düzlemin kayma düzlemi üzerindeki izi olup, kaymış ve kaymamış bölgeleri ayırmaktadır. Kayma düzleminin sol tarafındaki b kadarlık kayma EH dislokasyonu üzerinde sıfıra düşmektedir.

Kenar dislokasyonu, kayma düzleminin üzerinde ise pozitif kenar dislokasyonu (\perp), kayma düzleminin altında oluşmuş ise negatif kenar dislokasyonu adını alır (τ). Şekil 2.5.c de basit kübik yapıda kayma düzleminin üzerinde oluşmuş bir pozitif kenar dislokasyonu görülmektedir.

Dislokasyonun kayma vektörüne Burgers vektörü denir. Kenar dislokasyonunda dislokasyon çizgisi Burgers vektörüne diktir fakat dislokasyon çizgisi, Burgers vektörü ile aynı yönde hareket eder.

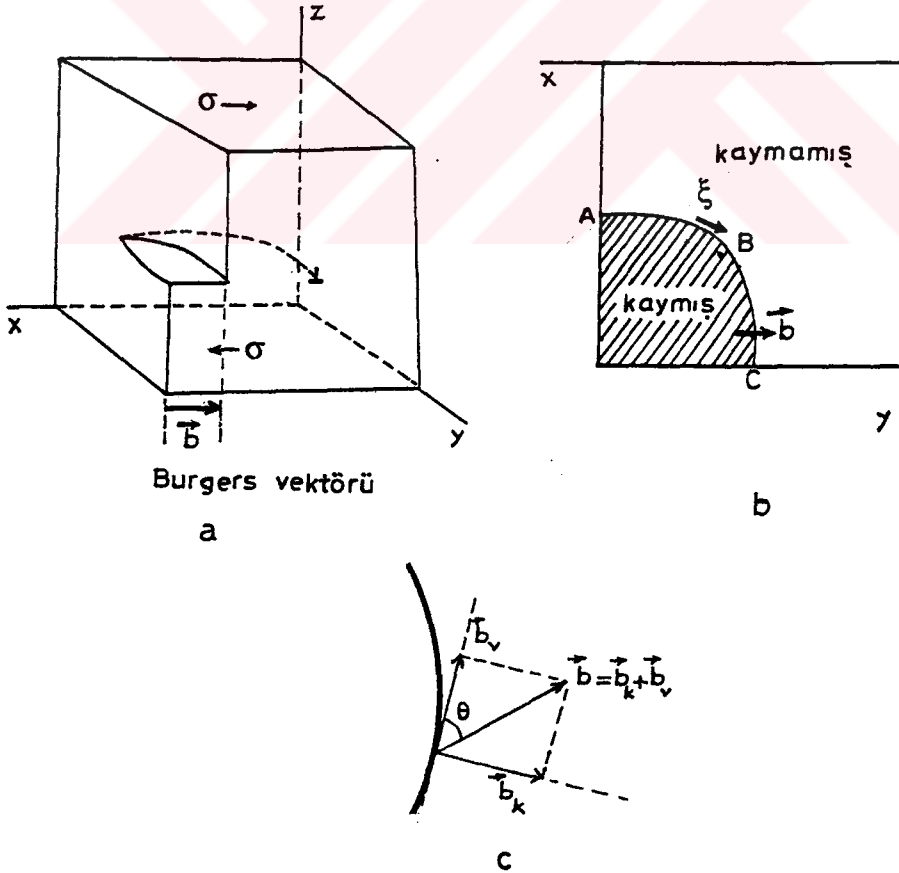
Burgers 1939 yılında kenar dislokasyonundan ayrı olarak vida dislokasyonu denilen bir dislokasyon tipinde kristallerde meydana gelebildiğini göstermiştir¹. Şekil 2.6.a da, kristalin Burgers vektörü yönünde, gösterilen tarzda kayması ile vida dislokasyonunun meydana gelişi görülmektedir. Şekil 2.6.b de ise vida dislokasyonu etrafındaki atomların dizilişi görülmektedir.



Şekil 2.6.a) Vida dislokasyonunun görünüşü, b) Vida dislokasyonu etrafındaki atomların dizilişi. ABCD kayma düzlemi, AD dislokasyondur. İçi boş daireler kayma düzlemi üzerindeki, içi dolu daireler kayma düzleminin altındaki atomları göstermektedir.

Kaymış ve kaymamış bölgeler arasındaki sınır tarif gereğince yine dislokasyondur. Ancak bu kez AD dislokasyon çizgisi, Burgers vektörüne paralel olup, Burgers vektörüne dik hareket eder. Bu tip dislokasyona vida denilmesinin nedeni, dislokasyon etrafındaki kristal düzlemlerinin vida dişi yüzeyi şeklinde olmasındandır. Şekil 2.6.a da görüldüğü gibi, dislokasyonun yönü ile Burgers vektörünün yönü aynıdır. Bu tip dislokasyona pozitif vida veya sağ el vida dislokasyonu denir. Sağ el vida dislokasyonu denilmesinin nedeni, dislokasyon civarındaki atom düzlemlerinin, dislokasyonun pozitif yönünde ilerleyen bir sağ el vidanın dış düzlemlerine benzemesindedir. Vida dislokasyonunda kenar dislokasyonunda olduğu gibi fazladan yarı düzlem yoktur. Şunuda belirtmek gerekir ki , kayma düzleminde kenar yada vida dislokasyonunda geçse kristalin nihai şekli aynı kalmaktadır.

Kenar ve vida dislokasyonları vasıtasıyla dislokasyon kavramı genelleştirilebilir. Şekil 2.7 a ve b de görüldüğü gibi, kaymış ve kaymamış bölgeler arasındaki sınır çok sayıda kenar ve vida kademelerinden teşekkül edebilir. Bu kademeler gittikçe çoğalır ve boyları atomik mertebeye indirilince bu sınır bir eğri olabilir (Şekil 2.7.b).



Şekil 2.7. a) Makaslama zorları tesirinde karışık dislokasyonun oluşumu, b) kaymış ve kaymamış bölgeler c) karışık dislokasyonda Burgers vektörü.

Sonsuz küçük bir dislokasyon çizgisinin Burgers vektörü ile Θ açısı yaptığını düşünelim. $\Theta = 0^\circ$ ise o parça vida doğrultusunda, $\Theta = 90^\circ$ ise kenar doğrultusundadır.

Θ bu değerlerden farklı ise bu sonsuz küçük parça, vida ve kenar bileşenlerinin üstüste gelmesi ile meydana gelmiştir. Bu bileşenlerin Burgers vektörleri, karışık dislokasyona ait vektörün dislokasyon çizgisine teğet ve normal bileşenleridir (Şekil 2.7.c). Böylece karışık dislokasyonda Burger vektörü, $\vec{b} = \vec{b}_v + \vec{b}_k$ ifadesi ile verilir.

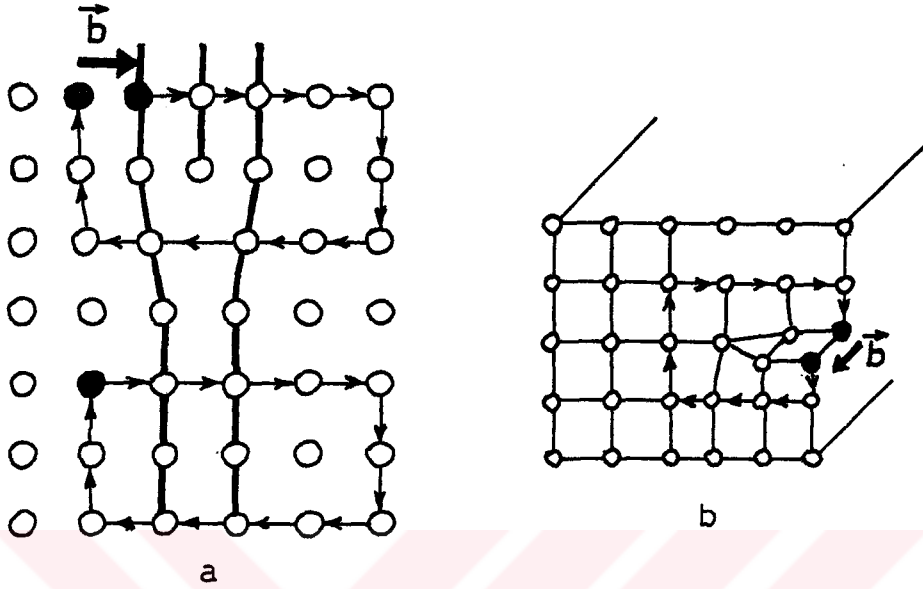
Önemine göre dislokasyonlar, noktasal kusurlardan iki bakımdan farklıdır. Bunlardan birincisi, noktasal kusurların gözlenmesinin zorluğu, ikincisi ise dislokasyonların termodinamik dengede olan kristallerde farkedilebilir konsantrasyonda olmalarıdır. Dislokasyonlar kristalin serbest enerjisini daima yükseltirler. Böylece dislokasyonların kristal içinde ortaya çıktığı bölgeler kristalin ideal halindeki bölgelere göre daha yüksek enerjili bölgelerdir. Mesela Cu kristali için bu enerji atom düzlemi başına 6 eV civarındadır²⁷. Noktasal kusurlar ise kristalin serbest enerjisini daima minimuma indirmeye çalışırlar. Bunun nedeni noktasal kusurların çevreden sağladıkları entropi kazancıdır. Noktasal kusurların hareketliliği de önemli bir özelliktir. Zira bir düzlem üzerinde noktasal kusurların hareketi, dislokasyonun kaymasına sebep olurken, noktasal kusurların kristal içinde meydana getirilmeleri veya yokedilmeleri dislokasyonun tırmanmasına karşılık gelir. Dolayısıyla metallerdeki madde difüzyonu noktasal kusurların meydana getirilmeleri veya yokedilmeleri ile ilgilidir.

2.5. Burgers Çevrimi ve Burgers Vektörü

Bir dislokasyonu karakterize eden temel büyüklük Burgers vektörüdür. Dislokasyon hareket ederken, dislokasyonun şekli, doğrultusu ve uzunluğu değişebilir ancak Burgers vektörü değişmez. Zira dislokasyon, kristal içinde belli miktar ötelenmiş kısmın ötelenmemiş kısmı ile olan sınırdır. Ötelenen kısmın geometrisi, dolayısıyla sınırın şekli ve kayma yönüne nazaran doğrultusu ile distorsiyonun şekli (kenar veya vida tipi) değişebilir. Fakat ötelenmenin miktarı ve yönü (Burgers vektörü) sınırın yani dislokasyonun her yerinde aynıdır.

Burgers vektörü, Burgers çevriminin kapanma farkı olarak tarif edilir. Burgers çevrimi, bir dislokasyon etrafındaki kristalde, her doğrultuda belli sayıda adım atarak dönmek suretiyle çizilir. Şekil 2.8.a ve b de kenar ve vida dislokasyonlarının Burgers çevrimi ve

Burgers vektörlerinin nasıl tayin edildikleri gösterilmiştir.



Şekil 2.8. a) Altta dislokasyonu ihtiva etmeyen, üstte bir kenar dislokasyonu etrafındaki, b) vida dislokasyonu etrafındaki Burgers çevrimi ve Burgers vektörü.

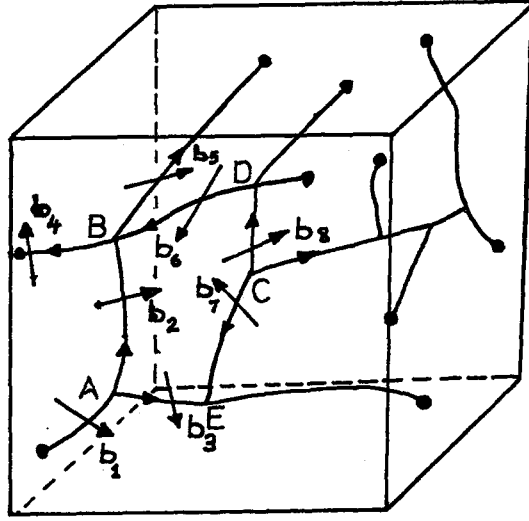
Burgers çevrimi, dislokasyonu ihtiva etmeyen veya başka bir kristal kusuru ihtiva eden bölgede kapanır sadece dislokasyonu etrafında kapanmaz. Burgers vektörü kristoloğrafik bir doğrultu olmalıdır. Zira, dislokasyonu kayma düzleminin sonuna ulaştığında kristal düzeninin aynı kalması gerekir. Gerek dislokasyonu yönünün gerekse Burgers vektörünün seçiminde kesin bir anlaşma yoktur. Bu durum Burgers vektörünün şiddetine tesir etmemekle birlikte yönünü değiştirebilir²⁶.

Dislokasyonlar, yüzeyde, tane sınırında veya kendi üzerlerinde kapanarak sona ererler. Dislokasyonlar birbiri üzerinde sona ermeleriyle kristal içinde üç boyutlu bir ağ teşkil ederler. Dislokasyonların kristal içindeki kesişme noktalarına düğüm yada node denir.

Genel olarak kristallerde düğüm noktaları arası 1-10 μ arasında değişir. Şekil 2.9 da böyle bir ağ görülmektedir. Bir düğüm noktası için Burgers vektörlerinin korunumu veya Frank kaidesine göre, bir düğüm noktasına giren ve çıkan Burgers vektörlerinin cebirsel toplamı sıfırdır. Buna göre Şekil 2.9 daki ağ da B düğümü için,

$$\vec{b}_2 + \vec{b}_6 = \vec{b}_4 + \vec{b}_5 \quad (2.2)$$

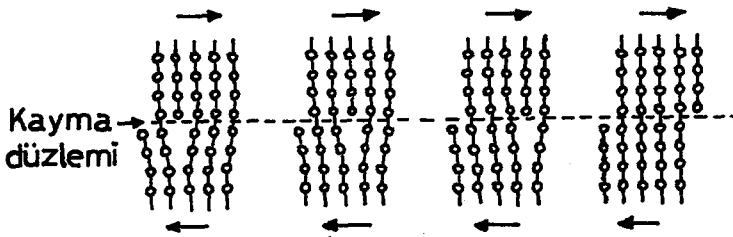
ifadesi yazılabilir.



Şekil 2.9. Dislokasyon ağı ve Burgers vektörlerinin korunumu.

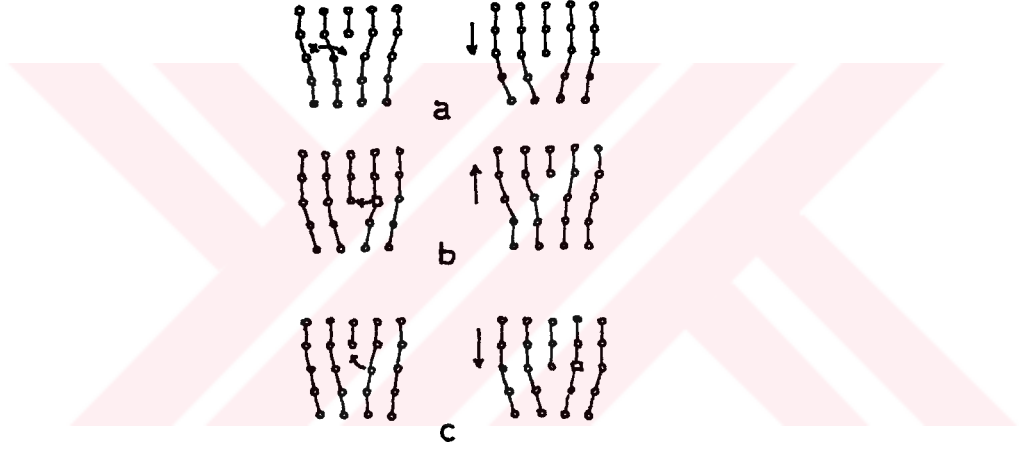
2.6. Dislokasyonların Hareketi

Dislokasyonlar kayma ve tırmanma hareketi yaparak yer değiştirirler^(1,3,25,26). Bunlardan kayma hareketi, kayma düzlemi üzerinde sınırlı ve korunumlu bir hareket olup, kristale uygulanan dış kuvvetlerin meydana getirdiği ve kayma düzlemine etkiyen makaslama zorunun, kristal sürtünme gerilmesi (Pierls zoru) ve diğer kristal kusurlarının dislokasyona gösterdiği direnci yendiği zaman ortaya çıkar. Kayma hareketi, dislokasyon civarındaki atomik bağların yeniden düzenlenmesi ile meydana gelir (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. Bir kenar dislokasyonunun kayma hareketi.

Kenar dislokasyonunun ve vida dislokasyonunun kendilerini ihtiva eden düzlem içindeki kayma hareketi madde difüzyonuna ihtiyaç göstermez. Düşük sıcaklıklarda difüzyon zor olduğundan ve noktasal kusurların konsantrasyonlarının azlığında dislokasyon hareketleri kayma düzlemi içinde sınırlı olup kayma ile hareket ederler. Ancak yüksek sıcaklıklarda kenar dislokasyonu ve karışık dislokasyonun kenar bileşeni kayma düzlemine dik olarak hareket edebilir. Tırmanma hareketi adı verilen ve madde difüzyonuna ihtiyaç göstermesinden dolayı korunumsuz bir hareket olan tırmanma hareketi, kenar dislokasyonu ve karışık dislokasyonun kenar bileşeninde mevcut olan fazladan yarı düzleme atomların eklenmesi ile uzanması, atomik boşlukların eklenmesi ile kısılması neticesinde meydana gelir (Şekil 2.11). Dolayısıyla tırmanma hareketinde noktasal kusurların meydana getirilmesi veya yokedilmeleri sözkonusudur.

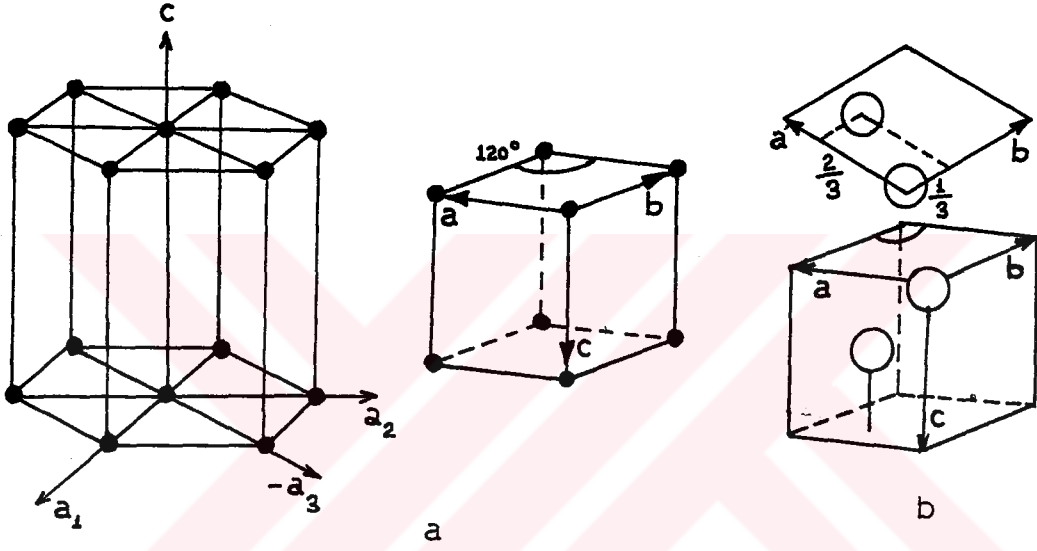


Şekil 2.11. İki boyutlu örgüde noktasal kusurların meydana getirilmeleri veya yokedilmeleri ile dislokasyonların tırmanma hareketi. a) Ara yer atomunun yokolması , b) Boşluk yokolması (pozitif tırmanma), c) Boşluk meydana getirilmesi (negatif tırmanma) .

Noktasal kusurların kristal içindeki hareketleri belli bir aktivasyon enerjisi gerektirdiğinden, dislokasyonun tırmanma ile hareket edebilmesi için bu enerjinin dislokasyona verilmesi gerekir. Bu nedenle tırmanma hareketinin yüksek sıcaklıklarda daha kolay meydana geldiği düşünülebilir.

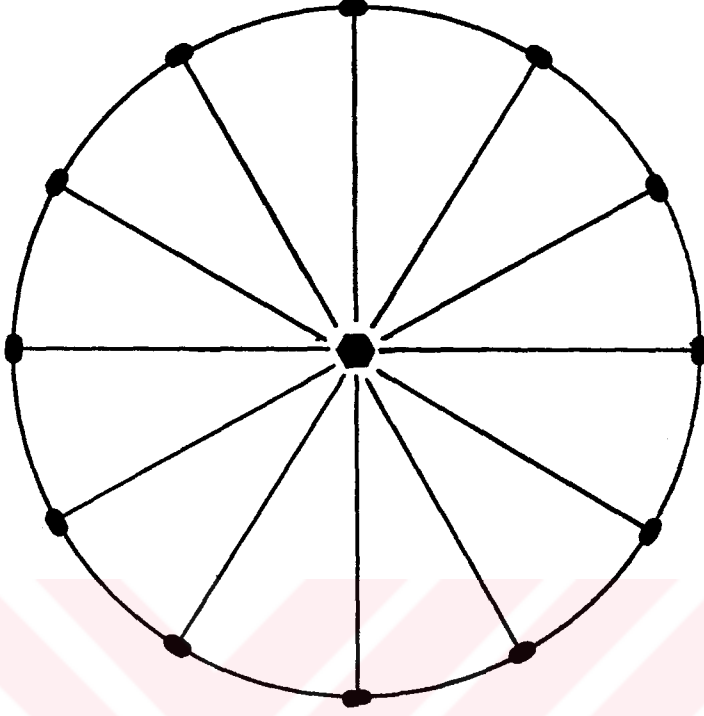
2.7. Kadmiyum Kristalinin Yapısı

Kadmiyum kristali Şekil 2.12.a da görüldüğü gibi hekzagonal sıkı paketlenmiş yapıda kristalleşir. Her birim hücrede, biri 000 (orjinde) diğeri $2/3 \ 1/3 \ 1/2$ (birim hücrenin iç tarafında ve ortada) olmak üzere iki atom vardır (Şekil 2.12.b). Eksen uzunlukları $a=b \neq c$ olup örgü parametreleri $a= b=2.9787 \text{ \AA}$, $c=5.617 \text{ \AA}$ dir²⁸.



Şekil 2.12. a) Hekzagonal sıkı paketlenmiş yapı, b) Basit hekzagonal yapıda atomların yerleşimi.

Kadmiyum $6/mmm (D_{6h})$ nokta grubuna dahil olup²⁹, bir altılı dönme ekseni ve altı tane ikili dönme ekseni mevcuttur (Şekil 2.13).



Şekil 2.13. Kadmiyum kristalinin 6/mmm yansıma düzlemleri.

Kristal yönelimlerini tayin etmek amacıyla, streografik izdüşüm üzerinde doğrultu (Şekil 2.14.a) ve düzlem (Şekil 2.14.b) kutuplarının yerleri ile kristolografik açıları²⁸, doğrultular için,

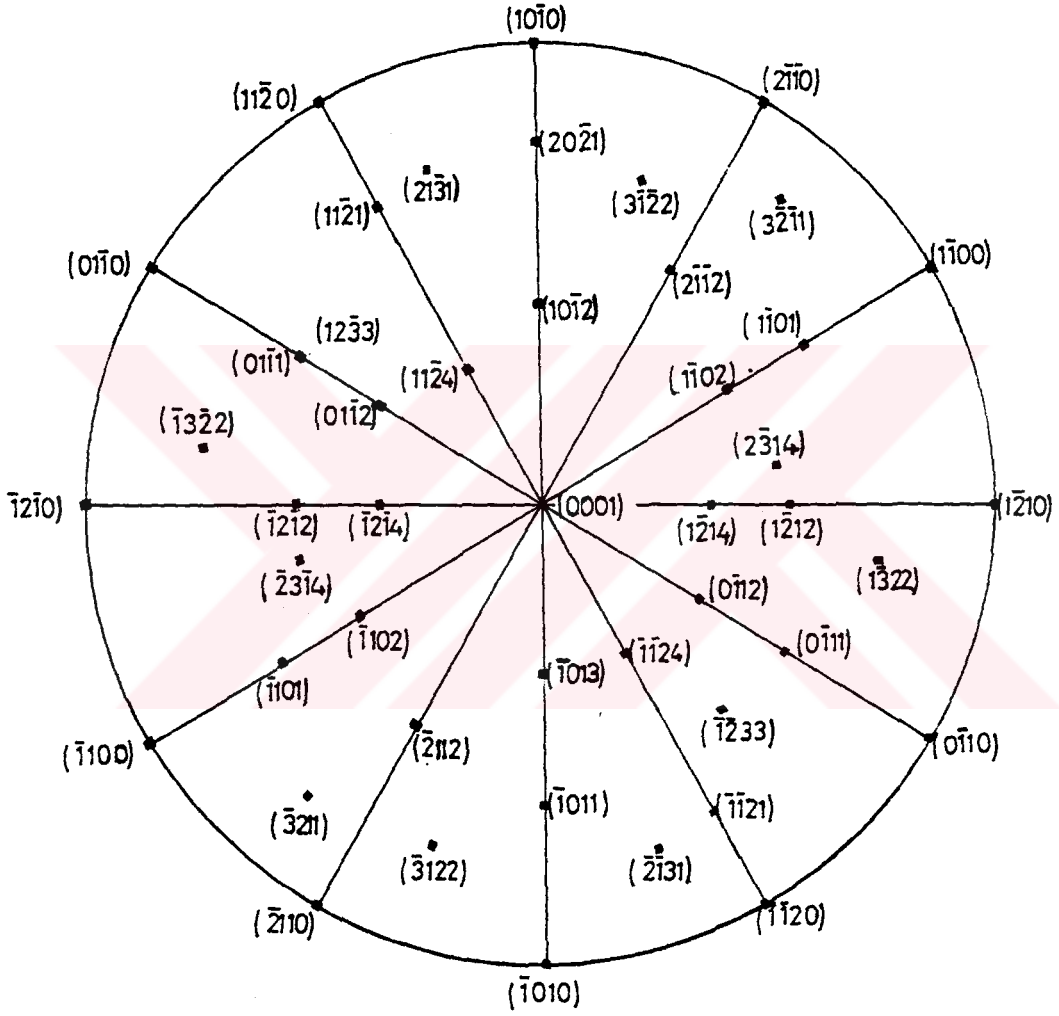
$$\text{Cos}\theta = (u_1u_2 + v_1v_2 + z_1z_2 + w_1w_2) / [(u_1^2 + v_1^2 + z_1^2 + w_1^2)^{1/2} \cdot (u_2^2 + v_2^2 + h_2^2 + w_2^2)^{1/2}] \quad (2.3)$$

düzlemler için,

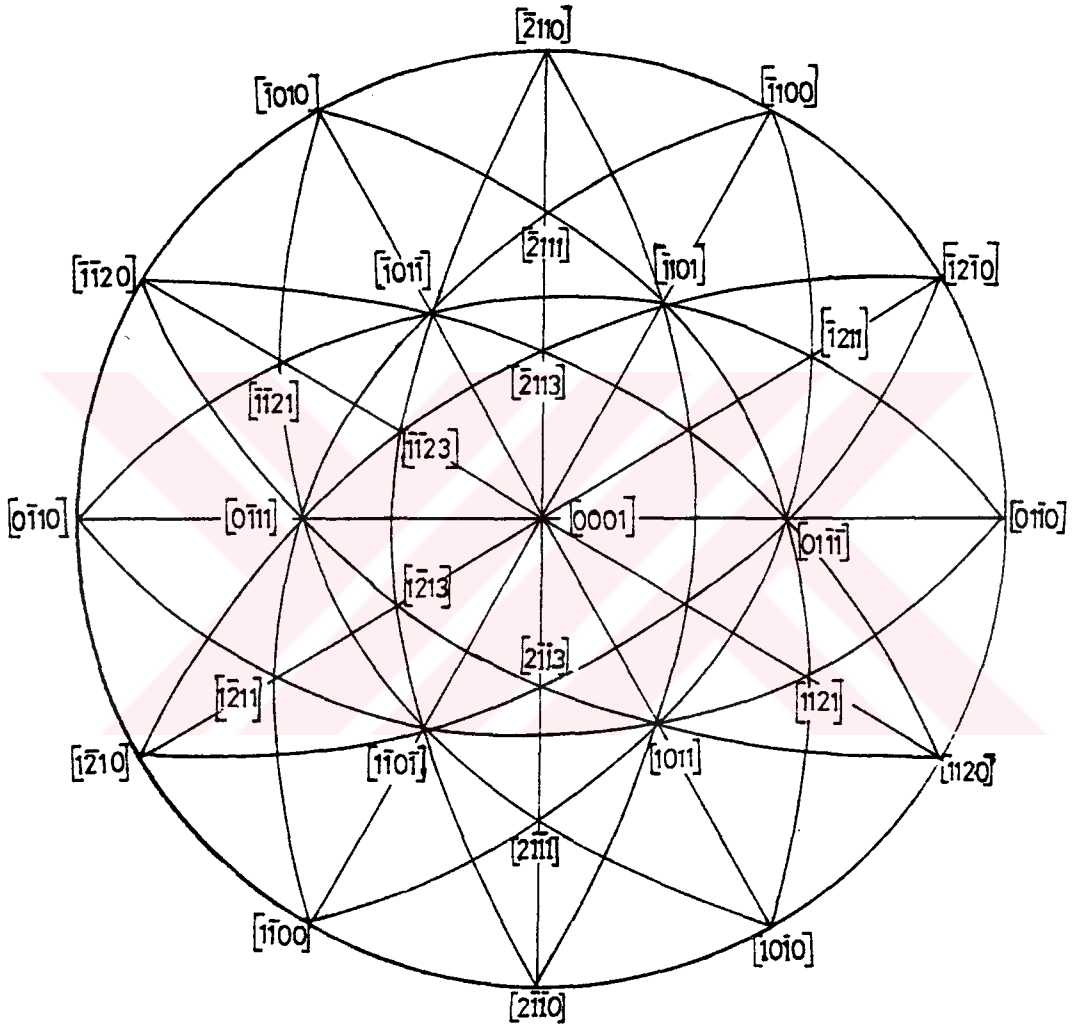
$$\text{Cos}\theta = [h_1h_2 + k_1k_2 + 1/2(h_1k_2 + h_2k_1) + 3a^2/4c^2l_1l_2] / \quad (2.4)$$

$$[(h_1^2 + k_1^2 + h_1k_1 + 3a^2/4c^2l_1^2)^{1/2} \cdot (h_2^2 + k_2^2 + h_2k_2 + 3a^2/4c^2l_2^2)^{1/2}]$$

ifadelerinden yararlanarak Ek-A da verilen bilgisayar programı ile hesaplanmış ve izdüşüm üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 2.14.a. Cd kristalinin başlıca düzlemlerini gösteren (0001) Streografik izdüşümü.

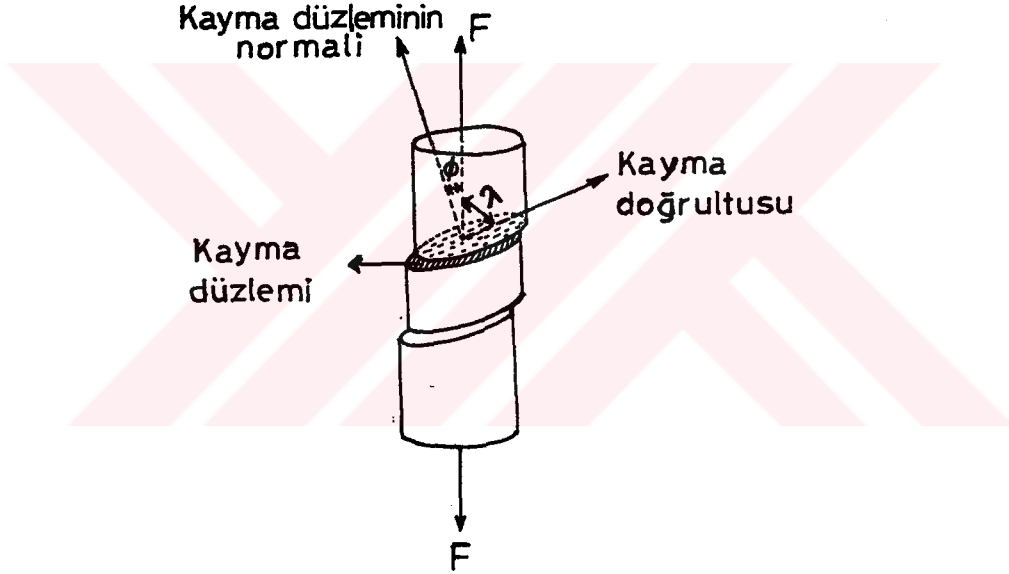


Şekil 2.14.b Cd kristalinin başlıca doğrultularını gösteren [0001] streografik izdüşümü.

2.8. Kadmiyum Kristalinde Gözlenen Kayma Sistemleri

Kristalleşmiş maddelerde plastik deformasyonun en önemli atomsal mekanizması kaymadır. Plastik deformasyon, dislokasyonlar vasıtasıyla, kayma düzlemi adı verilen bir düzlem üzerinde atom düzlemlerinin birbirleri üzerinde hareketleri ile ortaya çıkar. Kristallerde bu tür ortaya çıkan yapı bozuklukları, bozukluğun üzerinde olduğu düzlem ve bozukluğun oluşum doğrultusu ile birlikte verilir. Dolayısıyla bir düzlem ve bir doğrultudan oluşan bilgi takımına o bozukluğun kayma sistemi denir.

Kayma için, kritik bir makaslama zoru gereklidir. Şekil 2.15 de görüldüğü gibi kristalin uygulanan bir F dış kuvveti altında deforme olduğunu düşünelim.



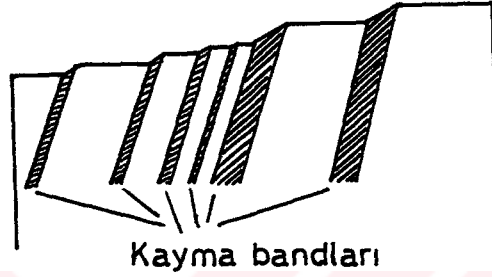
Şekil 2.15 Kristalleşmiş bir maddede kayma geometrisinin şematik gösterimi.

Kristalin kesit alanı A ise çekme zoru F/A dır. Kayma düzleminde kayma için gerekli makaslama zoru,

$$\sigma = (F/A)\cos\theta\cos\lambda \quad (2.5)$$

ifadesi ile verilir. Buradaki λ ve θ açıları sırasıyla, çekme doğrultusu ile kayma doğrultusu ve kayma düzleminin normali arasındaki açıdır. Eğer F_c , kaymayı başlatacak

kritik bir çekme kuveti ise kristal yöneliminden bağımsız olan σ_k ya kritik makaslama zoru denir. Kayma ile kristal yüzeyinde oluşan basamaklar (kayma bandları) deformasyondan önce iyice temizlenip parlatılan kristallerde rahatlıkla gözlenebilir³. Şekil 2.16 da deformasyona uğramış bir kristalde oluşan kayma bandları şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.16. Bir monokristalde deformasyonla birlikte ortaya çıkan kayma bandlarının şematik görünüşü.

Kayma anizotropik olup, bazı düzlemler üzerinde ve bazı doğrultular boyunca daha sık ortaya çıkar^(9,25). Dislokasyon teorisi, oda sıcaklığında, Burgers vektörünün büyüklüğü en küçük dislokasyonun ve düzlemler arası mesafesi (d) en büyük olan düzlemlerin enaz Pierls zoruna maruz kaldıklarını dolayısıyla bu düzlem ve doğrultular boyunca kaymanın daha sık ortaya çıktığını görülmektedir. Sıkı paketlenmiş hegzagonal yapıda kristalleşen Cd kristalinde bahsedilen şartları sağlayan düzlem (0001), doğrultu ise $[11\bar{2}0]$ dir. Bu düzlem ve doğrultudan oluşan kayma sistemi sık görülmesine rağmen, zorlanma hızı, büyüme şartları ve kullanılan maddenin saflığından dolayı diğer bazı düzlem ve doğrultulardan oluşan kayma sistemlerine de rastlanmaktadır. Tablo 2.1 de çeşitli araştırmacılar tarafından değişik zamanlarda Cd kristalinde gözlenen kayma sistemleri ve mevcut çalışmada gözlenen kayma sistemleri toplu olarak verilmiştir.

Tablo 2.1 Kadmiyum kristalinde gözlenen kayma sistemleri.

Oda Sıcaklığında Aktif Kayma Sistemi	Yüksek Sıcaklıklarda Aktif Kayma Sistemi	Referans
$[11\bar{2}0](0001)$	-	30
$[11\bar{2}0](0001)$	-	31
$[11\bar{2}0](0001)$	-	32
$[11\bar{2}0](0001)$	-	33
-	$[11\bar{2}0](10\bar{1}0)$	34
$[11\bar{2}0](10\bar{1}1)$	-	35
$[\bar{1}2\bar{1}0](0001)$ $[1\bar{2}10](10\bar{1}0)$ $[1\bar{2}10](10\bar{1}1)$	-	36
$[2\bar{1}\bar{1}0](0001)$ $[2\bar{1}\bar{1}0](10\bar{1}0)$ $[0003](10\bar{1}0)$ $[2\bar{1}\bar{1}0](10\bar{1}1)$ $[2\bar{1}\bar{1}3](10\bar{1}1)$	-	12
-	$[11\bar{2}3](11\bar{2}2)$	38
$[11\bar{2}0](0001)$ $[11\bar{2}3](0001)$	-	13
$[\bar{1}\bar{1}23](10\bar{1}1)$ $[11\bar{2}3](\bar{1}100)$ $[2\bar{1}\bar{1}3](10\bar{1}1)$ $[11\bar{2}0](0001)$	$[\bar{1}\bar{1}23](11\bar{2}2)$	Mevcut Çalışma

2.9. Dislokasyon Üzerine Etki Eden Kuvvetler

2.9.1. Uygulanan Dış Kuvvetler Nedeniyle Dislokasyon Üzerine Etkiyen Elastik Kuvvet

Şekil 2.17 de olduğu gibi A yüzeyine bir F_1 dış kuvvetinin etki ettiğini düşünelim. Bu kuvvet bir nokta kuvvet olmayıp, yüzey üzerine homojen olarak etki etsin. Koordinat sistemini, x eksenini yüzeye dik, y ve z eksenlerini yüzeye paralel olarak seçilirse, F_1 kuvveti birbirine dik, birisi yüzeye dik ikisi yüzeye paralel üç bileşene ayrılabilir.



Şekil 2.17 A yüzeyine etkiyen F_1 dış kuvveti.

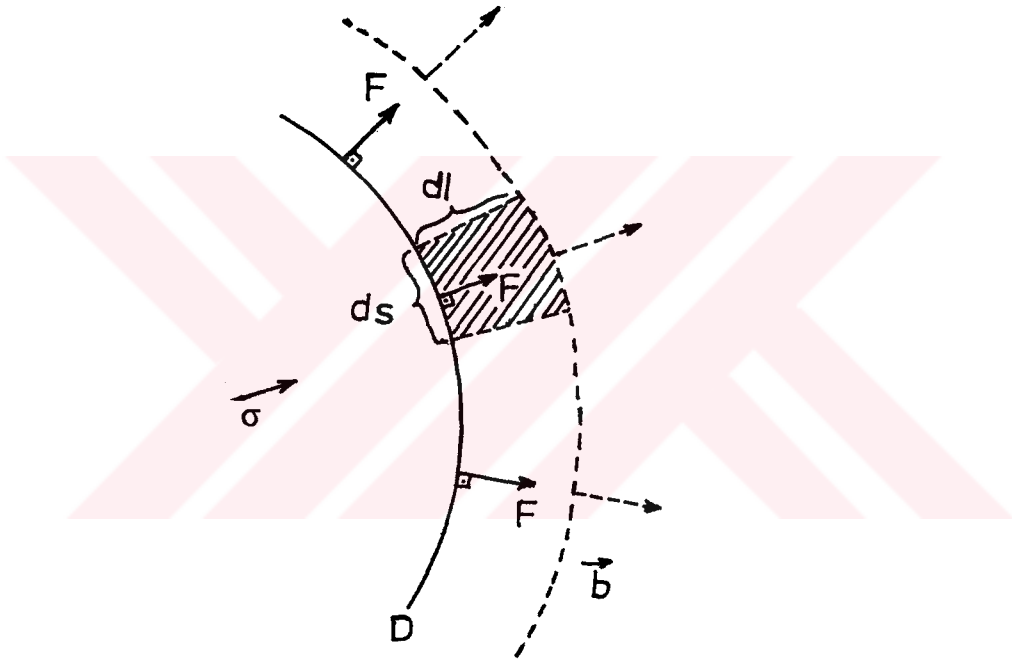
A birim alan olarak seçilirse, x yönünde yüzeye dik σ_{xx} , y ve z yönünde yüzeye paralel kuvvetleri sırasıyla σ_{xy} , σ_{xz} zor bileşenleri ile gösterilebilir. Böylece F_1 kuvveti,

$$F_1 = \sigma_{xx}i + \sigma_{xy}j + \sigma_{xz}k \quad (2.6)$$

şeklinde yazılabilir²⁶. Buradaki i, j, k sırasıyla x, y, z yönündeki birim vektörlerdir.

Birim alana etkiyen kuvvet zor olarak adlandırılır ve denklem 2.6 daki σ_{xx} , σ_{xy} , σ_{xz} zor bileşenleridir. Eğer zor, yüzeyden dışarı ve yüzeye dik etki ediyorsa çekme, yüzeye dik ve içeriye doğru ise sıkıştırma zoru adını alır. Buna göre çekme zorları pozitif, sıkıştırma zorları ise negatiftir. Yüzeye paralel etkiyen zorlarada makaslama zorları adı verilir. Şimdi bu kabullenimleri bir dislokasyon üzerine uygulayalım.

Dislokasyon, kendi kayma düzlemine etkiyen σ makaslama zorunun tesirinde hareket ederek, kayma düzleminin iki tarafındaki kristal parçalarını birbirine göre hareket ettirir. Dislokasyon kristal içinde belirli bir tip distorsiyonu karakterize eden hayali bir çizgi olduğuna göre, dislokasyon üzerine etkiyen kuvvette gerçek olmayıp, hayali bir kuvvettir. Şekil 2.18 de görüldüğü gibi bir D dislokasyon çizgisi σ makaslama zoru tesirinde kaymış olsun.



Şekil 2.18 Dislokasyonun birim boyuna etkiyen F kuvvetinin hesaplanması.

Dislokasyonun ds parçası, dl kadar ilerlediğinde dsl kadar alan süpürür. Kayma düzleminin toplam alanı A ise, ds dislokasyon hareketi ile meydana gelen kayma miktarı,

$$(ds \cdot dl) \cdot b / A \quad (2.7)$$

ifadesi ile verilir. Bu ifade de b Burgers vektörüdür. Kayma düzleminin üst veya

altındaki kristal parçasına etkiyen kuvvet σA olduğuna göre, kayma sırasında yapılan iş,

$$dW = \sigma A \cdot (ds \cdot dl \cdot b) / A \quad (2.8)$$

ifadesi ile verilir. Dislokasyonun birim boyuna etkiyen F kuvvetinin yaptığı iş ise,

$$dW = F \cdot ds \cdot dl \quad (2.9)$$

dir. Bu iki işin eşit olması gerektiğinden,

$$\vec{F} = \sigma \cdot \vec{b} \quad (2.10)$$

eşitliği elde edilir. Bu kuvvet, dislokasyonun her noktasında dislokasyon çizgisine diktir.

$\vec{F} = \sigma \cdot \vec{b}$ kuvveti dislokasyonu kaydırmaya çalışan kuvvettir. Kenar dislokasyonu ve karışık dislokasyonun kenar bileşenini tırmanma hareketine zorlayan kuvvet ise $\vec{F} = \tau \cdot \vec{b}$ dir.

Buradaki τ , fazlardan yarı düzlemin üzerindeki normal (dik) gerilmedir. Dislokasyonun,

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

ile tanımlanan bir zor alanında olduğu düşünülürse ve t_x, t_y, t_z dislokasyon çizgisine teğet birim vektörler olarak alınırsa, dış kuvvet tarafından dislokasyonun birim uzunluğuna etkiyen F kuvveti,

$$F = (t_y \cdot G_z - t_z \cdot G_y) \mathbf{i} + (t_z \cdot G_x - t_x \cdot G_z) \mathbf{j} + (t_x \cdot G_y - t_y \cdot G_x) \mathbf{k} \quad (2.12)$$

şeklinde yazılır. Burada,

$$\begin{aligned}
 G_x &= \sigma_{xx} \cdot b_x + \sigma_{xy} \cdot b_y + \sigma_{xz} \cdot b_z \\
 G_y &= \sigma_{yx} \cdot b_x + \sigma_{yy} \cdot b_y + \sigma_{yz} \cdot b_z \\
 G_z &= \sigma_{zx} \cdot b_x + \sigma_{zy} \cdot b_y + \sigma_{zz} \cdot b_z
 \end{aligned}
 \tag{2.13}$$

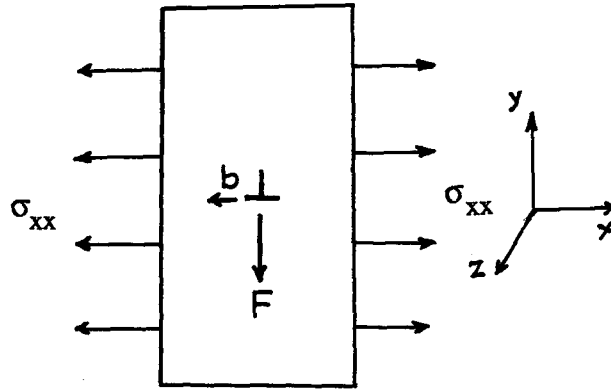
şeklinde olup, b_x, b_y, b_z Burgers vektörlerinin bileşenleridir. Simetriden dolayı

$\sigma_{xy} = \sigma_{yx}$, $\sigma_{xz} = \sigma_{zx}$, vb şeklindedir.

Denklem 2.12 ifadesi vektör notasyonunda,

$$\vec{F} = \begin{pmatrix} i & j & k \\ t_x & t_y & t_z \\ G_x & G_y & G_z \end{pmatrix} = \vec{t} \times \vec{G}
 \tag{2.14}$$

şeklinde yazılabilir. İlk kez Peach ve Koehler³⁹ tarafından türetilen bu eşitlikte, vektörel çarpımdanda görüleceği gibi F kuvveti, dislokasyon çizgisine her noktada diktir. Bu eşitliği bir örnek olması açısından aşağıdaki kenar dislokasyonuna uygulayalım.



Şekil 2.19 Dislokasyona etkiyen elastik kuvvet (dislokasyonun pozitif yönü pozitif z doğrultusu seçilmiştir).

Şekil 2.19 daki dislokasyonun Burgers vektörü negatif x yönünde, çekme zoru x yönünde olsun. Kenar dislokasyonunda, Burgers vektörü dislokasyon çizgisine dik olduğundan, dislokasyona teğet vektör t, kağıt düzleminden içeriye veya dışarıya yöneliktir. Bu teğet vektörün işareti konusunda araştırmacılar arasında kesin bir anlaşma olmamakla birlikte, çoğu araştırmacı - özellikle denklem 2.14 ifadesini türeten Peach ve Koehler - Burgers vektörü şekildeki gibi sola doğru ise dislokasyonuna teğet vektör t yi kağıt düzleminden dışarı doğru kabul etmektedirler. Bu kabullenim altında dislokasyona teğet vektör t nin t_z bileşeni mevcuttur. 2.14 ile verilen vektörel çarpım ifadesini kullanarak, F kuvveti

$$F = \begin{pmatrix} i & j & k \\ 0 & 0 & t_z \\ G_x & G_y & G_z \end{pmatrix} = (t_z \cdot G_z)i - (-t_z \cdot G_x)j \quad (2.15)$$

şeklinde yazılabilir. Burgers vektörünün b_x bileşeni ve σ_{xx} çekme zoru mevcut olduğundan 2.15 eşitliği,

$$F = \sigma_{xx} \cdot b_x j \quad (2.16)$$

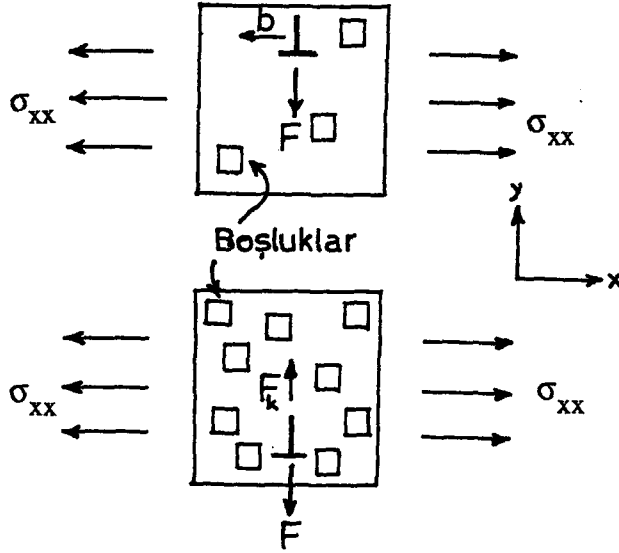
şekline dönüşür. Görüldüğü gibi bu kuvvet, dislokasyon çizgisine dik ve positif y doğrultusundadır.. Ayrıca bu kuvvet, dislokasyonun kayma düzlemine dik olduğundan, dislokasyonu tırmanma hareketi yapmaya zorlar ve dislokasyon bu kuvvetin etkisi altında tırmanma hareketi yapar.

2.9.2. Dislokasyon Üzerine Etki Eden Kimyasal Kuvvet

Yukarıda bir kenar dislokasyonu üzerine etkiyen, dış kuvvetlerden kaynaklanan kuvvetin ifadesi verildi. Kristaldeki bir dislokasyon üzerine bir dış kuvvet uygulanmasada, dislokasyon iç zorların etkisi altında kalır. İç zorların kaynağı, dislokasyonların diğer dislokasyonlarla etkileşmesi, dislokasyonların tane sınırlarında yığılmaları ve kirliliklerden kaynaklanan diğer kusurlardır. Dislokasyonların diğer dislokasyonlarla etkileşmeleri, elektrik yüklerinin aralarındaki uzaklıkla orantılı biçimde birbirlerine uyguladıkları kuvvetlere benzer²⁶. Zıt işaretli dislokasyonlar (pozitif kenar, negatif kenar dislokasyonu veya sağ el, sol el vida dislokasyonu) için bu kuvvet çekici, aynı işaretteki dislokasyonlar için bu kuvvet itici şekilde ortaya çıkar.

Şimdide kristal içindeki noktasal kusurlardan meydana gelen kimyasal kuvvet için bir ifade türeteceğiz. Daha önce kesim 2.3 de örgü boşlukları ve arayer atomları noktasal kusurlar olarak tarif edilmişti. Dislokasyonlar, kristal içinde çizgisel kusurlar olduklarından noktasal kusurlardan farklıdır. Bir kenar dislokasyonu üzererine etkiyen kuvvetler analiz edildiğinde noktasal kusurların önemi ortaya çıkar. Çünkü dislokasyonların tırmanma hareketi noktasal kusurlarla sağlanır (Kesim 2.6). Kristal içindeki örgü boşlukları ve ara yer atomları, kenar dislokasyonunda mevcut olan fazladan yarı düzleme difüze olduklarında veya dislokasyon çizgisinden uzaklaştıklarında dislokasyon tırmanma hareketi ile yer değiştirir.

Noktasal kusurların varlığında dislokasyon üzerine etkiyen kuvvetin kaynağını bulabilmek şekil 2.20 deki küp içindeki kenar dislokasyonunun davranışına bakmak gerekir. Boşluk difüzyonu sıcaklıkla birlikte hızla arttığından, kristalin sıcaklığını sabit ve kimyasal kuvvet için bir ifade türetmek için arayer atomlarının kristal içindeki varlıklarını ihmal edeceğiz. Ayrıca, örgü boşluklarının meydana gelme ve yokolmaları kristal yüzeyinde meydana gelebileceğinden, küp şeklindeki maddenin yüzeyinin ince bir film ile kaplandığını kabul edeceğiz. Böylece, boşluklar sadece dislokasyon çizgisinin kendisinde meydana gelecekler veya yokolacaklardır.



Şekil 2.20 Kimyasal kuvvet.

Şekil 2.20 deki gibi bir kenar dislokasyonu üzerine σ_{xx} çekme zoru uygulandığında, dislokasyon üzerine $\sigma_{xx} \cdot b$ büyüklüğünde bir kuvvet etki eder. Burgers vektörünün yönü negatif x , çekme zoru σ_{xx} olduğundan bu kuvvetin yönü aşağıya doğrudur (Şekil 2.20). Dislokasyonun, kayma düzlemine dik olan bu kuvvet etkisi altında aşağıya doğru hareketi, atomların dislokasyon çizgisine difüze olmalarını gerektirir. Böylece madde içindeki örgü boşluklarının sayısı artar. Bir süre sonra bu aşırı boşluk konsantrasyonu sebebiyle σ_{xx} zoru artırılmadıkça dislokasyon hareketine devam edemez. Bu şartlar altında aşırı boşluk konsantrasyonunun, $F = \sigma_{xx} \cdot b_j$ ile verilen, dış kuvvete eşit ve zıt yönde bir F_c kimyasal kuvvetini meydana getirdiğini düşünmek gerekir. Böylece dislokasyon üzerine etkiyen net kuvvet sıfır olur, dislokasyon aşağı ve yukarı hareket edemez.

Dislokasyon üzerine noktasal kusurlardan kaynaklanan kuvvet üzerine ilk teorik hesaplamalar Bardeen ve Herring²² tarafından türetilmiştir. Bunun için öncelikle noktasal kusurların denge konsantrasyonlarının hesaplanması gerekmektedir.

Mutlak sıfır sıcaklığında kristalin en düşük enerji hali, boşluk konsantrasyonunun sıfır olduğu haldir. Sonlu sıcaklıkta kristalin enerjisi iç enerjiden ziyade, serbest enerji olup, minimum olmalıdır. Sabit sıcaklık ve basınçta G Gibbs serbest enerjisi,

$$G = \Delta U - T \Delta S + P \Delta V \quad (2.17)$$

ifadesi ile verilir. Buradaki ΔU iç enerjideki değişme, ΔV hacimdeki değişme, ΔS ise entropideki değişmedir. P ve T basınç ve sıcaklıktır. Her zaman boşluklar içeren bir kristalde, bir boşluk oluştuğunda serbest enerjideki değişme,

$$G = Q_v - TS_v + PV_v \quad (2.18)$$

ile verilir. Buradaki Q_v , bir boşluk oluşumunun ortalama enerjisi, S_v bir boşluk meydana getirildiğinde entropideki ortalama değişme, V_v ise bir boşluğun hacmidir (bir atomun hacmine her zaman eşit olmayabilir).

Entropiye örgü boşluklarının katkısı, onların örgü içindeki rastgele dağılımları ile ilgilidir. Bir sistemin entropisi,

$$S = k \cdot \log W \quad (2.19)$$

ile verilir. k Boltzman sabiti, W ise boşlukların örgü içindeki değişik düzenlenmelerinin sayısıdır.

N örgü noktasına sahip bir kristal N_v boşluk ihtiva ediyorsa, $N - N_v$ atom içerir. Bu durumda kristal içindeki boşlukların düzenlenmelerinin sayısı $N! / (N - N_v)! N_v!$ ile verilir. Stirling* yaklaşımını kullanarak değişik düzenlenmelerinin sayısı için,

*

Stirling Yaklaşımı,

$\log x! \approx x \log x$ şeklindedir.

$$\begin{aligned} S &= k \log W = k \log \frac{N!}{(N - N_v)! N_v!} = k [\log N! - \log(N - N_v)! - \log N_v!] \\ &= k [N \log N - (N - N_v) \log(N - N_v) - N_v \log N_v] \\ &= k [N \log N - N \log(N - N_v) + N_v \log(N - N_v) - N_v \log N_v] \end{aligned}$$

$N \gg N_v$ olduğundan,

$$S = k \log W \approx k N_v \log N - N_v \log N_v \approx k N_v \log \frac{N}{N_v} \quad \text{şekline dönüşür.}$$

$$\log W = \log \left(\frac{N}{N - N_v} \right) \approx N_v \cdot \log N / N_v \quad (2.20)$$

elde edilir. Kristalde her zaman $N \gg N_v$ olduğundan boşlukların entropiye katkıları

$$k \cdot \log N / N_v \quad (2.21)$$

olur. Denge de boşlukların meydana gelme veya yokolmaları ile meydana gelen serbest enerjideki değişme sıfır olmalıdır.

$$G = Q_v - TS_v - kT \log (N/N_v) + PV_v = 0 \quad (2.22)$$

Buradaki S_v , bir boşluğun oluşumunun entropiye katkısını göstermektedir.

Denklem 2.22 den dengedeki boşlukların sayısı N_v ,

$$N_v = N \exp(S_v/k) \exp(-PV_v/kT) \exp(-Q_v/kT) \quad (2.23)$$

şeklinde elde edilir. Q_v ve S_v konsantrasyondan bağımsız olduklarından, boşlukların konsantrasyonu hidrostatik basınca bağlıdır.

Eğer σ_{xx} zoru sıfır ise şekil 2.20 deki tırmanma hareketi yapan dislokasyon üzerine bir iş yapılmaz. Ancak kristalin sıcaklığı sabit değilse, boşluk konsantrasyonu artacağından dislokasyon denge konumunu korumak için tırmanma hareketi yapmak zorunda kalır. σ_{xx} zoru sıfır değilse şekil 2.20 deki dislokasyon çizgisinin birim uzunluğuna etkiyen kuvvet $F = F_y j$ olup y yönündedir. Bu kuvvetin büyüklüğü ise $\sigma_{xx} b$ dir. Dislokasyon birim uzunluk tırmanırken yapılan iş ise F_y dir. Aynı zamanda, dislokasyon birim uzunluk tırmanırken meydana getirilen veya yokolan boşlukların sayısı b/v_A dir. Buradaki v_A boşluğun hacmi, b ise Burgers vektörünün büyüklüğüdür. Böylece meydana getirilen

her bir boşluk için σ_{xx} dış zorunun kristal üzerine yapacağı iş $F_y v_A / b$ dir. Dış zorların olmadığı durumda bir boşluk meydana getirildiğinde denge halindeki serbest enerjideki değişmeyi veren, denklem 2.22 ifadesi, dış zorların varlığında aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$G = Q_v - TS_v - kT \log N_v / N_v^0 + PV_v - F_y v_A / b - PV \quad (2.24)$$

$$G = kT \log N_v / N_v^0 - F_y v_A / b - PV = 0 \quad (2.25)$$

Buradaki N_v ve N_v^0 sırasıyla denge ve ani boşluk konsantrasyonlarıdır. Serbest enerji minimum olduğundan, dislokasyonun tırmanma yönünde bir eğilimi yoktur. σ_{xx} dış zorunun aşağıya doğru uyguladığı kuvvetten dolayı dislokasyon tırmanmak istemez.

Böylece 2.25 eşitliğindeki $kT \log N_v / N_v^0 - PV$ terimlerini, $F_y v_A / b$ kuvvet terimine zıt bir kuvvet terimleri olarak düşünmek uygundur. Bu eşitlik kimyasal kuvvet tanımı olarak kullanılır. Kimyasal kuvvet tırmanma yönünde olup $F_y j$ ye paraleldir. Böylece tırmanma hareketi yapan bir dislokasyon üzerine etkiyen kimyasal kuvvet,

$$F_c = - b/v_A (kT \log N_v / N_v^0) j + P b j \quad (2.26)$$

ifadesi ile verilir.

Denklem 2.26 daki kimyasal kuvvet ifadesindeki P basıncı,

$$P = -1/3 (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}) \quad (2.27)$$

Şeklindedir.

Hirt ve Lothe²⁵, l uzunluğundaki bir dislokasyon parçasına etkiyen kimyasal kuvveti,

dış zorlardan kaynaklanan $F_{el.}$ ve noktasal kusurlardan kaynaklanan $F_{osm.}$ kuvvetlerinin toplamı olarak aşağıdaki biçimde yazmışlardır.

$$F_c/l = F_{el.}/l + F_{osm.}/l \quad (2.28)$$

Buradaki dış zorlardan kaynaklanan elastik kuvvetin tırmanma bileşeni,

$$F_{el.}/l = (b \cdot \Sigma) x \xi \cdot (bx \xi) / |bx \xi| \quad (2.29)$$

şeklindedir. İfadede Σ zor tensörünü, ξ de dislokasyona teğet vektörü göstermektedir.

Noktasal kusurlardan kaynaklanan osmotik kuvvet ise,

$$F_{osm.}/l = -kTb_e \log(N/N_v) / v_A \quad (2.30)$$

ifadesi ile verilmekte olup, dislokasyonun tırmanma yönündeki Burgers vektörünün bileşeni b_e ,

$$b_e = (bx \xi) \cdot (bx \xi) / |bx \xi| \quad (2.31)$$

şeklindedir.

Dislokasyonun birim boyuna etkileyen toplam tırmanma kuvveti (kimyasal kuvvet), $bx \xi$ yönünde yani kayma düzlemine dik yöndedir.

Peach ve Koehler tarafından bulunan 2.26 ifadesi, $N_v = N_v^0$ olsada hidrostatik basıncın dislokasyon üzerine bir kimyasal kuvvet etki ettireceğini göstermektedir.

3. DENEYSEL İŞLEMLER

3.1. Giriş

Bu çalışmada kullanılan Cd, % 99.99 saflıkta olup Fluka AG Buchs SG (İsviçre) şirketinden temin edilmiştir. 10^{-3} torr'luk basınç altında modifiye Bridgman metodu ile büyütülen kristallerin yönelimleri geri - yansımali Laue metodu ile belirlenmiştir. Daha sonra kristaller oda sıcaklığında ve farklı sıcaklıklarda, büyüme doğrultuları boyunca çekme işlemine tabi tutulmuşlardır. Çekme neticesinde kristal yüzeylerinde oluşan kayma basamakları vasıtasıyla, kristallerin kayma doğrultuları ile büyüme doğrultuları arasındaki açılar ölçülmüştür.

3.2. Kristallerin Büyütülmesi

3.2.1. Bridgman Metodu İle Kristal Büyütme

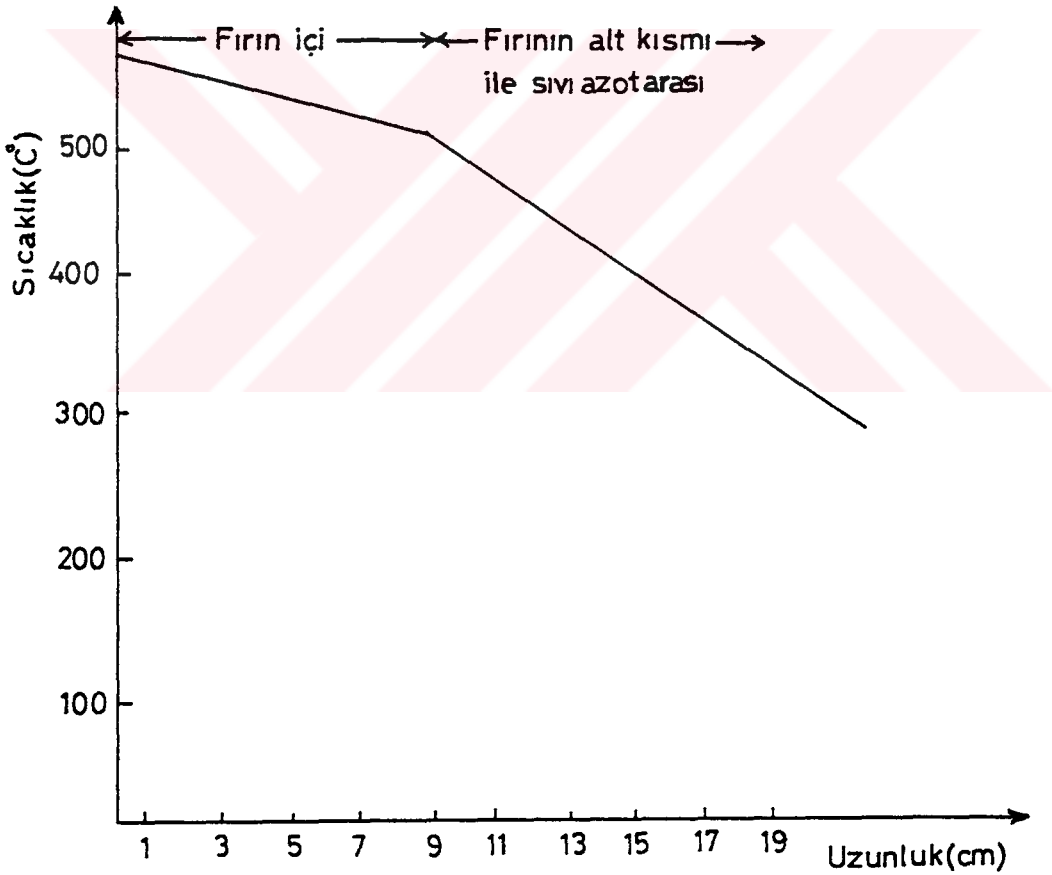
Bridgman metodu, bir pota içine konulan maddenin, potanın bir ucu erime sıcaklığının biraz üzerinde olacak şekilde bir sıcaklık gradientine yerleştirilip uygun bir çekme hızı ile potanın düşük sıcaklıklara doğru çekilmesine dayanan bir metottur. Pota düşük sıcaklıklara doğru çekildikçe uçta başlayan kristalleşme zamanla pota boyunca ilerler. Kristalleşmenin bir uçta başlaması için pota ucu konik yapılır. Çekme hızı, sıcaklık gradienti ve maddenin termal iletkenliğine göre seçilir. Uygun çekme hızlarında katı-sıvı arayüzeyi düzlemsel olur. Madde tamamen vakumda veya asal gaz atmosferinde tutulabilir. Bu metod, buhar basıncı yüksek maddeler için oldukça pratiktir.

Bu çalışmada Bridgman metodu kullanılmakla birlikte, metodun uygulanmasında değişik bir yol izlenmiştir. Metod normal olarak uygulandığında, büyütülen kristali ancak deney sonunda görmek mümkün iken, deney düzeneğinde yapılan değişiklikle kristali, büyümeye başladığı andan itibaren gözlemek mümkün olmuştur. Böylece büyütülen kristalin yüzeyi, metal mikroskobu ile incelemeye elverişli olmaması durumunda deney durdurulmuş ve yeni bir deney hazırlığına geçilmiştir. Bu nedenle büyük ölçüde zaman tasarrufu sağlanmıştır

3.2.2. Fırın Sistemi

Sistem, rezistans ısıtmalı bir fırın, kristallerin büyütüldüğü cam kısım ve cam kısmın aşağı-yukarı hareket etmesini sağlayan küçük bir motordan meydana gelmektedir. Kristallerin büyütüldüğü cam kısım bir vakum sistemine bağlanmıştır.

Deney sistemini meydana getiren elemanlardan biri olan fırın 90 mm boyunda 80 mm çapında demirden silindir şeklindeki bir muhafaza içine yerleştirilmiştir. Fırın, rezistans takılmasına elverişli olup, ateş toprağından yapılmıştır. Uygun hesaplarla hazırlanan rezistans fırına takılmış ve direnç üzerinden geçen akım bir varyak ile kontrol edilmiştir. Bu fırının sıcaklık gradienti şekil 3.1 de görülmektedir. Biraz önce bahsedilen fırına ilaveten ön ısıtmayı sağlamak amacıyla ikinci bir fırın kullanılmıştır.

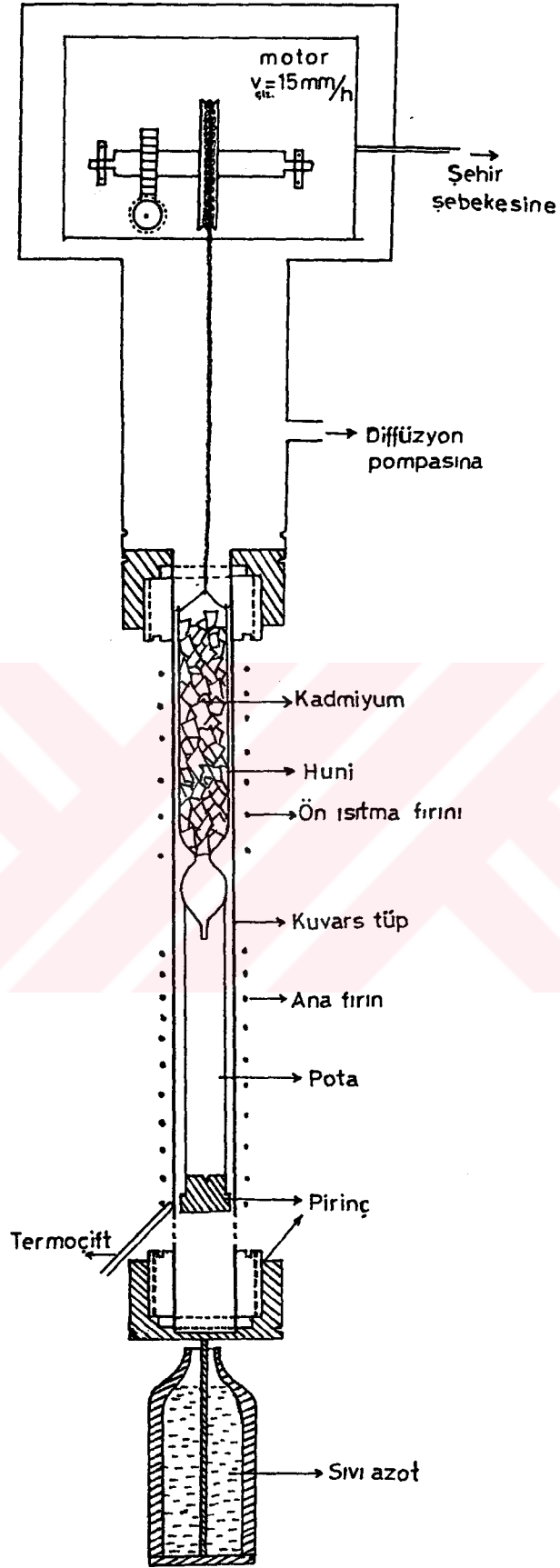


Şekil 3.1. Fırının sıcaklık gradienti.

Düşey konumda yerleştirilen bu fırınların eksenleri doğrultusunda 12.5 mm iç çaplı kuvars bir tüp geçmektedir. Tüpün kapalı olan alt ucu sıvı azotla temas halinde olup,

diğer ucu boşaltma sistemine bağlanacak biçimde hazırlanmıştır. Kuvars tüp içinde rahatça hareket edebilen ve iç çapı 6.5 mm, uzunluğu 130 mm olan adi camdan yapılmış bir pota kullanılmıştır. Alt ucu pirinç bir çekirdekle kapatılan pota, erimiş Cd'un süzülerek ve birazda kirlerinin tutularak akmasını kolaylaştıran bir huniye bağlanmıştır. Pota ve huniden oluşan bu sistem, ince bir zincirle küçük bir motora tespit edilmiştir. Büyütülen kristallerin katı-sıvı ara yüzeylerinin düzlemsel olmasını sağlamak için gereken çekme hızı, denemeler sonucunda 1.5 mm/dak. olarak tespit edilmiş ve motorun hızı bir dişli düzeneği ile bu değere indirgenmiştir. Kristallerin büyütüldüğü cam sistem ve fırınları da içine alan büyütme sisteminin şematik görünüşü şekil 3.2 de verilmiştir.





Şekil 3.2. Denev sisteminin şematik görünümü.

3.2.3. Kristallerin Büyütülmesi

Kadmiyum atom ağırlığı 112.41, atom numarası 48, erime noktası 594 K, kaynama noktası 1038 K ve 2 valans elektrona sahip bir elementtir⁴⁰. Yumuşak bir metal olan Cd, pil yapımında, atomik fisyonu kontrol engellerinde, kaplamacılıkta ve TV tüplerinde kullanılır. Oda sıcaklığında yüzeyi matlaşan Cd'un erime sıcaklığındaki buharlaşma basıncı 10^{-1} torr dur. Bu yüzden düşük basınçlarda çabucak buharlaşmaktadır. Bundan dolayı kristalleri düşük basınçlarda büyütmeğe kaçınılarak, denemeler sonucunda iyi netice veren 10^{-3} torr'luk basınç tercih edilmiştir. Bu basınç değerine ulaşıldıktan sonra, potanın alt ucu Cd'un erime sıcaklığının biraz üzerine çıkılarak ve sürekli kontrol edilerek 623 K e ulaşılmıştır. Bu andan itibaren huni ve potadan ibaret olan cam sistemin motor vasıtasıyla aşağı doğru hareketi başlatılmış ve ön ısıtma fırını vasıtasıyla eritilen Cd parçaları pota içine sürekli bir biçimde akmıştır. Bu potanın alt ucundaki pirinç çekirdek, kuvars tüpün alt ucundaki sıvı azotla temas halinde olan kısmına ulaştığında hareket durdurulmuş ve sistem soğumaya bırakılmıştır.

Bu şekilde büyütülen kristallerin çapı 6.5 mm, uzunlukları ise 80 - 100 mm arasında değişmektedir. Benzer şartlar altında modifiye Bridgman metodu ile büyütülen kristallerden, yüzeyleri metal mikroskobu altında incelemeye elverişli olan 13 kristal seçilmiş ve bunlar üzerinde çalışmalar yapılmıştır.

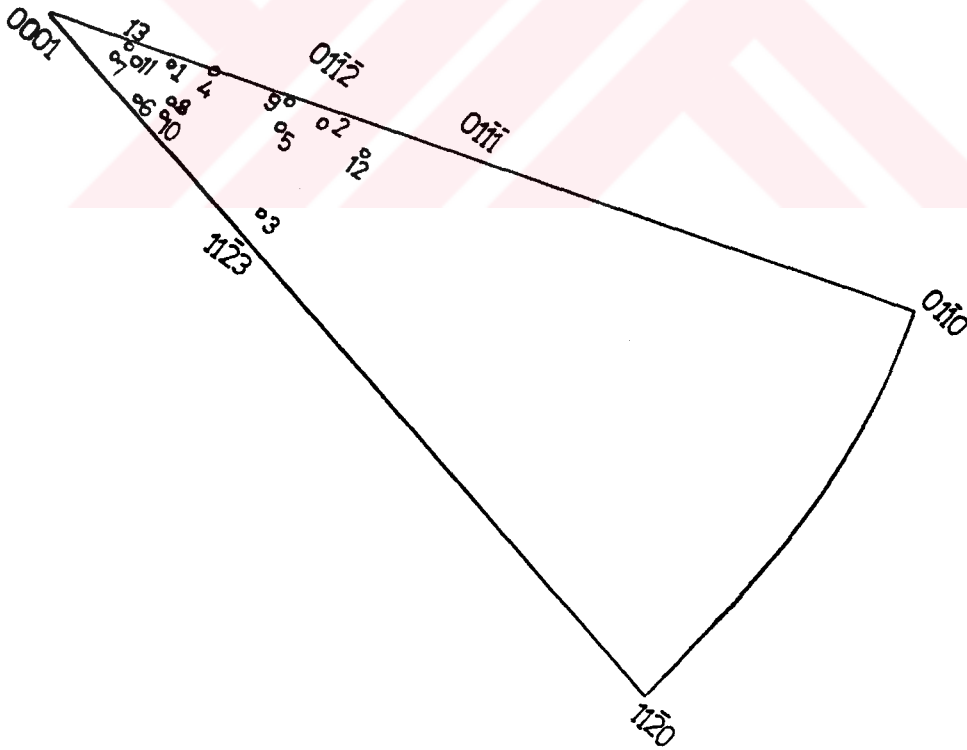
3.3. X-Işını Difraktometresi İle Kristal Resimlerinin Çekilmesi

Kristallerin yönelimlerinin tespiti ve kristallerin monokristal olup olmadıklarının araştırılması, geri-yansımali Laue metodu ile çekilen resimler vasıtasıyla yapılmıştır. Bunun için kristaller, numune tutacağı üzerindeki bir kızak üzerine, gelen x-ışınlarına dik olacak şekilde yerleştirilmişler ve bu kızak vasıtasıyla kristallerin yüzeyleri değişmeden en az üç değişik noktadan film çekilmiştir. Daha sonra filmi çekilen yüzey 180° ters döndürülmüş ve yine en az üç değişik noktadan film çekilmiştir. Kristallerin monokristal olup olmadıklarının araştırılması bu çekilen filmler üzerindeki lekelerin karşılaştırılmaları yanında optik yolla da kontrol edilmiştir.

30 kV ve 16 mA de yaklaşık 75 dak. ışınlanan kristallerden, kristal yönelimlerinin tesbitinde kullanmak amacıyla, büyüme doğrultuları boyunca filmler çekilmiştir.

3.4. Kristal Yönelimlerinin Tespiti

Geri - yansımali Laue metodu ile elde edilen fotoğraflar üzerindeki lekelerin streoğrafik iz düşümleri, kristal - film uzaklığı 3 cm için hazırlanmış Graninger kartı ve 30 cm çapındaki Wulf ağı kullanılarak Cullity tarafından verilen teknikle yapılmıştır²⁸. Yansıma düzlemlerinin kutupları arasındaki açılar streoğrafik izdüşüm üzerinde gösterilmiş ve ilk anda film üzerinde göze çarpan zonlar arasındaki açılar belirlenmiştir. Miller indisleri kesim 2.7 de anlatılan ve Ek-A da verilen bilgisayar programı ile hesaplanan standart 0001 streoğrafik izdüşümü vasıtasıyla tespit edilmiştir. Genel olarak, filmler üzerindeki herhangi bir eğri üzerindeki lekeler, belli bir zona ait düzlemlerden yansıyan ışınlarla aittir. Bu nedenle Laue lekelerinin miller indislerini belirlemeden önce bu zonların bilinmesi gerekmektedir. Gerek yan yüzeylerden gerekse büyüme doğrultularından çekilen filmler üzerinde elde edilen Laue lekeleri vasıtasıyla büyüme doğrultuları tespit edilen kristallerin, büyüme doğrultularının birim üçgen içindeki dağılımları şekil 3.3 de verilmiştir.



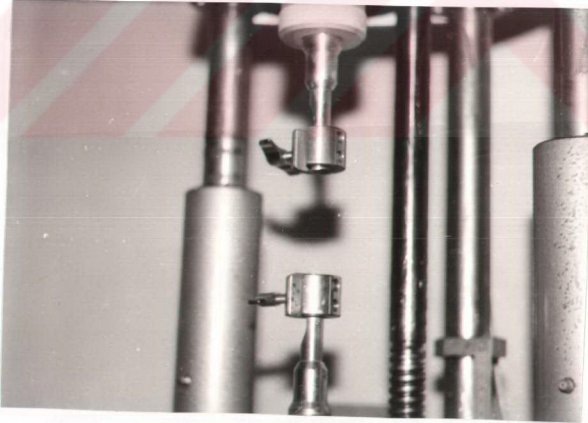
Şekil 3.3. Büyütülen Cd kristallerinin büyüme doğrultularının birim üçgen içindeki dağılımları.

Kadmiyum kristalleri kristalleşirken, [0001] doğrultusunu tercih etmelerine rağmen¹³, şekil 3.3 dende görüleceği gibi, bu çalışmada büyütülen Cd kristallerinin bazılarının büyüme doğrultuları [0001] doğrultusuna oldukça yakın iken, bazı kristallerin büyüme doğrultularının ise farklı olduğu gözlenmiştir.

3.5. Kadmiyum Kristallerinin Deformasyonu

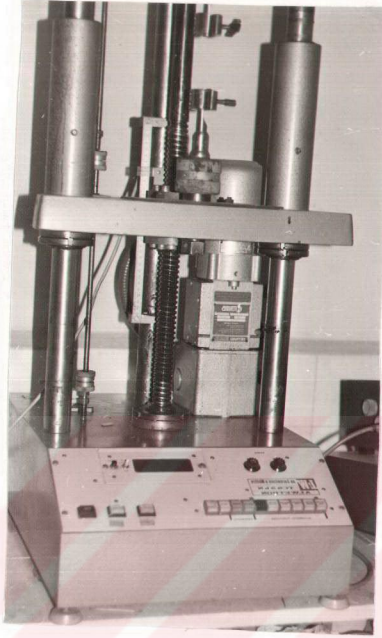
3.5.1. Kristallerin Oda Sıcaklığında Çekme İle Deformasyonu

Kristallerin çekme ile deformasyonu, AB Lorentzen ve Wettre firmasının 5kN' a kadar kuvvet uygulayabilen tam otomatik, elektronik kontrollü test makinası kullanılarak sağlanmıştır. Çekme işlemi için 1,2,3,...10 nolu kristaller oda sıcaklığında şekil 3.4 de görülen test makinasının çenelerine uygun olarak pirinçten yapılmış olan tutuculara lehimlenmişlerdir. Lehimlenen numuneler 5 mm/dak. lık bir çekme hızı ile büyüme doğrultuları boyunca çekilmişlerdir. Bu anda kaydedici ünite de 500 mm/dak.lık bir hızla çekme - uzama eğrileri tespit edilmiştir.



Şekil 3.4. Kristallerin lehimlendiği çeneler.

Kristallerin çekme ile plastik deformasyonlarını sağlayan test makinası ve çekme - uzama eğrilerini tespit eden kaydedici ünite şekil 3.5 de görülmektedir.



a



b

Şekil 3.5. a) Test makinası, b) Kaydedici ünitesi.

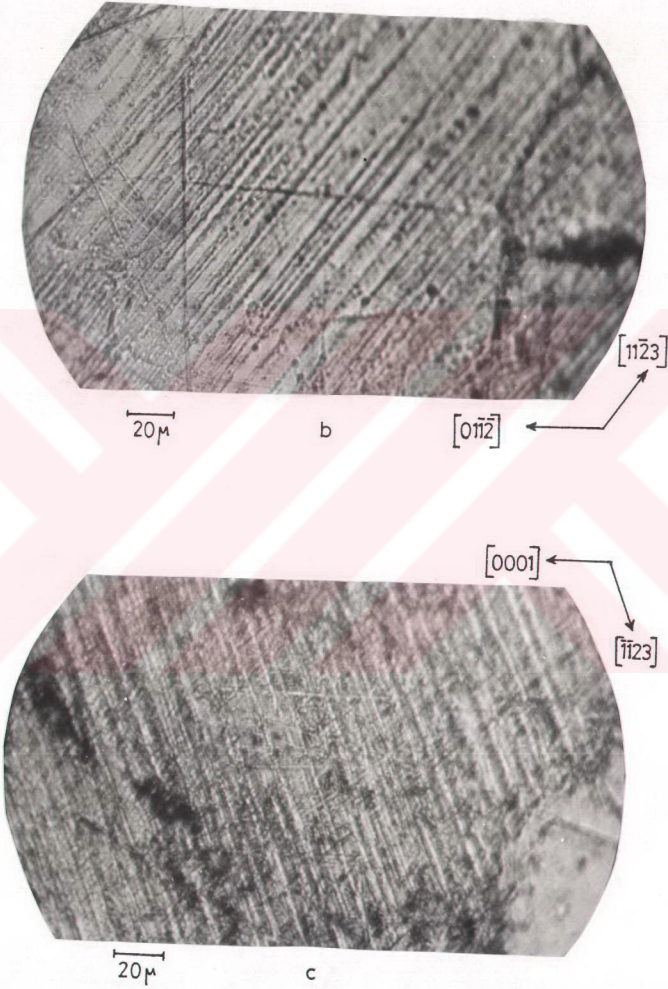
Deneme kristalleri üzerinde kopmayı sağlayan zor değeri tespit edilmiş ve deneyde kullanılan kristallerde zor, kopmayı sağlayan zor değerine yaklaşıncaya çekme işlemi durdurulmuş ve çok kısa bir süre sonra eski haline dönmüştür. Çekme işleminden sonra, kristallerin metal mikroskobu altında kayma bandlarının araştırılmasına geçilmiş ve gözlenen kayma bandları ile kristallerin büyüme doğrultuları arasındaki açılar (λ) ölçülmüştür. Daha sonra $\times 300$, $\times 700$, $\times 900$ doğrudan büyütmeyle, kristallerde gözlenen kayma bandlarının fotoğrafları metal mikroskobu altında çekilmiştir.

3.5.2. Kristallerin Dağlanması ve Farklı Sıcaklıklarda Çekme İle Deformasyon

11, 12, 13 nolu kristaller, dislokasyon hızlarının hesaplanması, sıcaklığın kayma sistemleri üzerine tesirinin belirlenmesi ve makaslama zorunun sıcaklığa bağımlılığına araştırmak için sırasıyla, 313, 333, 353 K sıcaklıklarda, % 98 lik metil alkol (CH_3OH), % 10 luk nitrik asit (HNO_3) çözeltisi (dağlama çözeltisi) içinde⁴¹, çekme işlemine tabi tutulmuşlardır. Lehimli çenelerin, dağlama solüsyonu içinde kalan kısımlarının aşınmalarını önlemek için ince bir film ile kaplanmıştır. Kristaller dağlama solüsyonundan çıkarılır çıkarılmaz saf su ile yıkanmış ve bu kristaller üzerinde büyüme doğrultuları ile kayma bandları arasındaki açılar (λ) ölçülmüştür.

Şekil 3.6 da 3, 5 ve 8 nolu kristallerden çekilen kayma bandları görülmektedir.





Şekil 3.6. a) 3 nolu kristalden, b) 5 nolu kristalden, c) 8 nolukristalden çekilen kayma bandlarının fotoğrafları.

4. DENEYSEL NETİCELER

4.1.Giriş

Oda sıcaklığında ve farklı sıcaklıklarda çekme işlemine tabi tutulan kristallerde ölçülen açılar yardımıyla kristallerin kayma sistemleri tespit edilmiştir. Ölçülen bu açılardan yararlanarak, Schmid çarpanları ve çekme-uzama eğrilerinden hareketle kristaller için makaslama zorları hesaplanmıştır. Dağlama solüsyonu içinde çekme işlemine tabi tutulan 11,12,13, nolu kristaller için dislokasyon hızları hesaplanmış daha sonra tüm kristallerde, dislokasyonların tırmanması esnasında dislokasyon üzerine etki eden kimyasal kuvvet hesaplanmıştır.

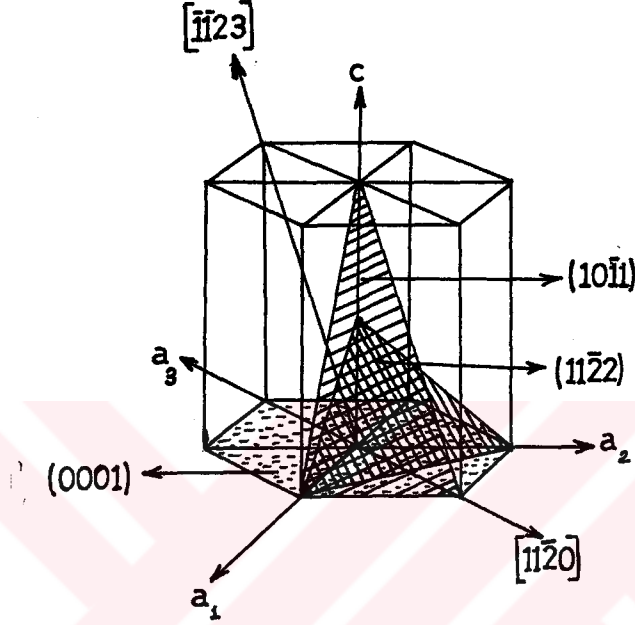
4.2.Etkili Kayma Sistemleri

Kristal sistemlerinin elastik deformasyonunun atom seviyesindeki en önemli mekanizması kaymadır. Bir kayma doğrultusu ile bir kayma düzlemi bir kayma sistemi teşkil eder. Tatbik edilen zorun, kayma sistemindeki bileşeni bir kritik değeri geçtiği zaman o sistemde kayma meydana gelir. Büyüme doğrultuları boyunca çekme işlemine tabi tutulan kristallerde, büyüme doğrultuları ve kayma bandları arasındaki açılardan (λ) yararlanarak, geliştirilen ve Ek-B de verilen bir bilgisayar programı vasıtasıyla kristallerin kayma doğrultuları ve kayma sistemleri teşkil edilmiştir. Elde edilen kayma sistemleri tablo 4.1 de verilmiştir.

Tablo 4.1 Bu çalışmada gözlenen kayma sistemleri, kristallerin büyüme doğrultuları, Schmid çarpanları ve kritik makaslama zoru değerleri.

Kristal No	Büyüme Doğrultusu	Kayma Sistemi	Kritik Mak. Zoru $\times 10^6$ Nm ⁻²	Schmid Çarpanı	Deneyin Yap.Sıcaklık C°
1	[0001]	$[\bar{1}\bar{1}23](10\bar{1}1)$	7.30	0.488	20
2	[01 $\bar{1}2$]	$[11\bar{2}3](\bar{1}100)$	4.21	-0.285	20
3	[11 $\bar{2}3$]	$[\bar{1}\bar{1}23](10\bar{1}1)$	3.93	0.19	20
4	[0001]	$[2\bar{1}\bar{1}3](10\bar{1}1)$	6.58	0.488	20
5	[01 $\bar{1}2$]	$[11\bar{2}3](\bar{1}100)$	4.21	-0.285	20
6	[0001]	$[2\bar{1}\bar{1}3](10\bar{1}1)$	6.96	0.488	20
7	[0001]	$[\bar{1}\bar{1}23](10\bar{1}1)$	5.54	0.488	20
8	[0001]	$[\bar{1}\bar{1}23](10\bar{1}1)$	6.35	0.488	20
9	[01 $\bar{1}2$]	$[11\bar{2}0](0001)$	4.80	-0.463	20
10	[0001]	$[\bar{1}\bar{1}23](10\bar{1}1)$	4.47	0.488	20
11	[0001]	$[2\bar{1}\bar{1}3](10\bar{1}1)$	8.96	0.488	40
12	[01 $\bar{1}2$]	$[\bar{1}\bar{1}23](11\bar{2}2)$	9.45	-0.306	60
13	[0001]	$[\bar{1}\bar{1}23](11\bar{2}2)$	14.67	0.488	80

Bu çalışmada oda sıcaklığında gözlenen (0001) $[11\bar{2}0]$, $(10\bar{1}1)$ $[\bar{1}\bar{1}23]$, ile yüksek sıcaklıklarda ortaya çıkan $(11\bar{2}2)$ $[\bar{1}\bar{1}23]$ kayma sistemleri şekil 4.1 de şematik olarak gösterilmişlerdir.



Şekil 4.1 (0001) $[11\bar{2}0]$, $(10\bar{1}1)$ $[\bar{1}\bar{1}23]$ ve $(11\bar{2}2)$ $[\bar{1}\bar{1}23]$ kayma sistemlerinin şematik olarak görünüşü.

4.3. σ_k Makaslama Zorunun Kritik değerleri ve Schmid Çarpanları

Deformasyona uğrayan kristallerde, etkili olan kayma sistemleri için Schmid çarpanı,

$$S = \text{Cos}\lambda \cdot \text{Cos}\theta \quad (4.1)$$

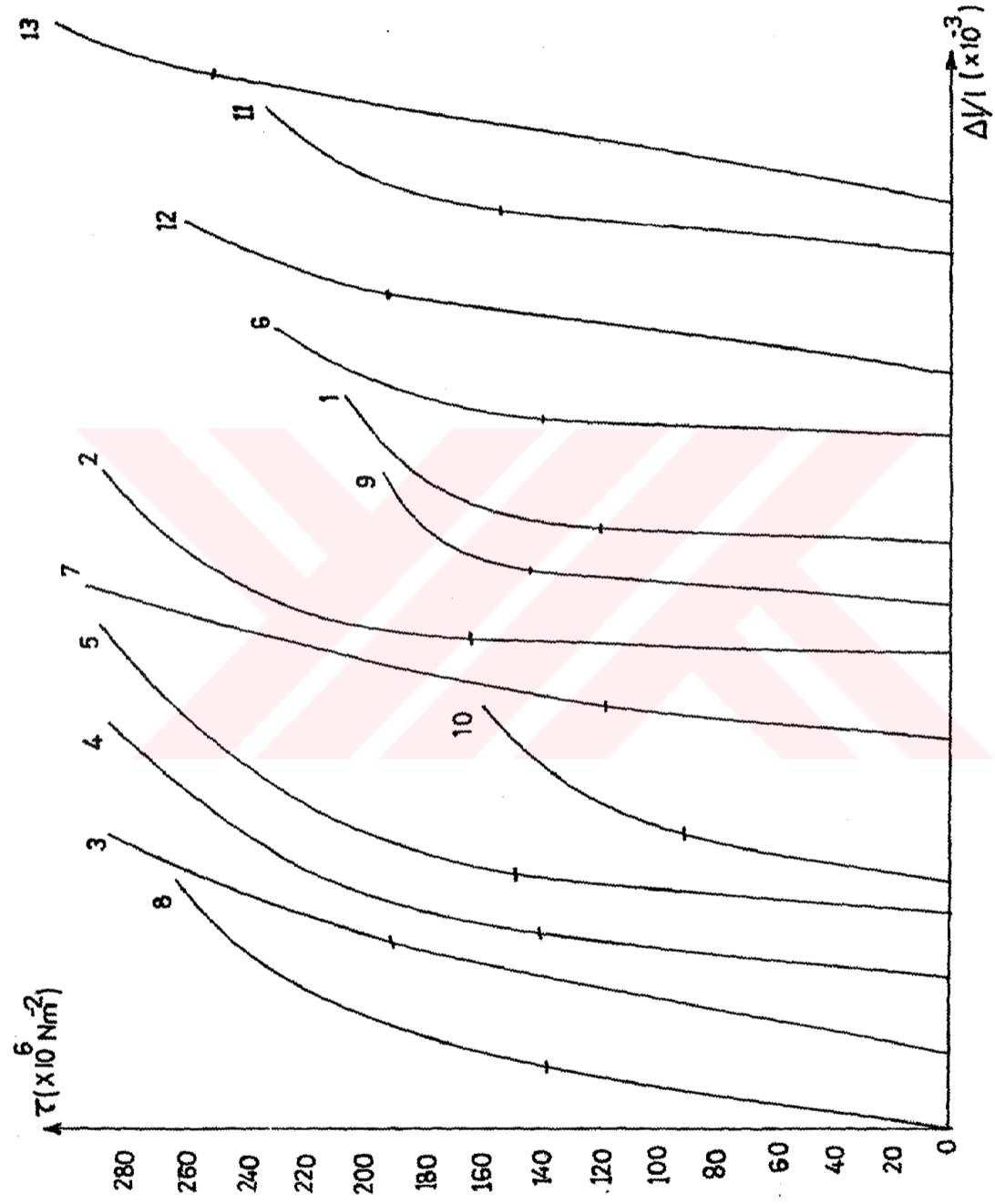
ifadesi ile verilir. Burada λ , çekme doğrultusu ile kayma doğrultusu arasındaki açıyı, θ ise çekme doğrultusu ile kayma düzleminin normali arasındaki açıdır (Şekil 2.15).

Gözlenen kayma sistemleri için makaslama zorunun kritik değerlerini bulmak için,

$$\sigma_k = \tau.S \quad (4.2)$$

ifadesinden yararlanılmıştır. Buradaki τ , şekil 4.2 de çizilen zor - zorlanma eğrilerinin lineerlikten ayrıldıkları noktaya (kritik nokta) karşılık gelmektedir.

Kristaller için hesaplanan Schmid çarpanı değerleri ve en büyük Schmid çarpanı için hesaplanan makaslama zorunun kritik değerleri, ilgili oldukları kayma sistemi ile birlikte tablo 4.1 de verilmiştir.



Şekil 4.2. Kristallere ait maksalama zoru - zorlanma eğrileri.

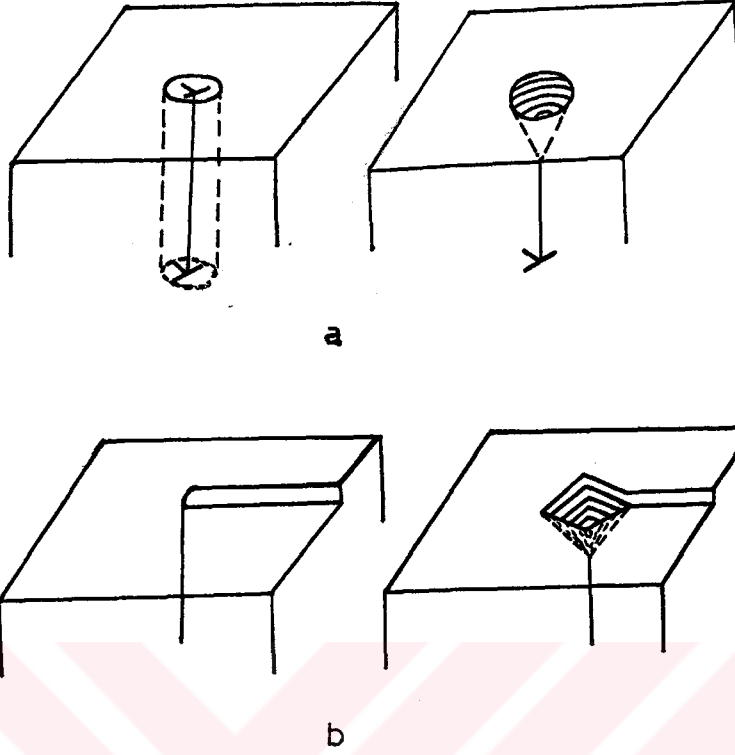
4.4. Fotoğrafik Büyütme

11, 12, 13 nolu kristallerde, kristal yüzeylerinde dağlama neticesinde oluşan dağlama çukurcuklarının tam değerlendirilmesi fotoğrafik büyütme ile yapılmıştır. Aytaş⁴² tarafından gerekli ilaveler yapılarak fotoğraf çekme özelliği kazandırılan metal mikroskobu ile 20x15, 50x15, 60x15 büyütmelemlerle kristallerin fotoğrafları çekilmiştir. Fotoğraflar üzerindeki toplam büyütmenin bulunması için, büyütmesi x12.5 olan bir oküler içine yerleştirilerek çekilen fotoğraflar üzerinde agrandizör büyütmesi 3.57 olarak bulunmuştur. Buna göre toplam büyütme, x50 ve x60 büyütmelemler için sırasıyla 2375 ve 2850, x20 büyütmelemler için 1140 olarak bulunmuştur. Bu durumda x1140 defa büyütülmüş bir yüzeyin fotoğrafı üzerinde alınan bir cm lik bir uzunluk gerçekte 30 mikrometreye, x2375 defa büyütülmüş bir yüzeyin üzerinden alınan bir fotoğraf üzerinde bir cm lik uzunluk gerçekte 20 mikrometreye, x2850 defa büyütülmüş bir yüzeyin fotoğrafı üzerindeki bir cm lik uzunluk gerçekte 10 mikrometreye karşılık gelmektedir.

4.5. Kadmiyum Kristalinde Dağlama Çukurcuklarının Oluşumu ve Dislokasyon Hızlarının Hesaplanması

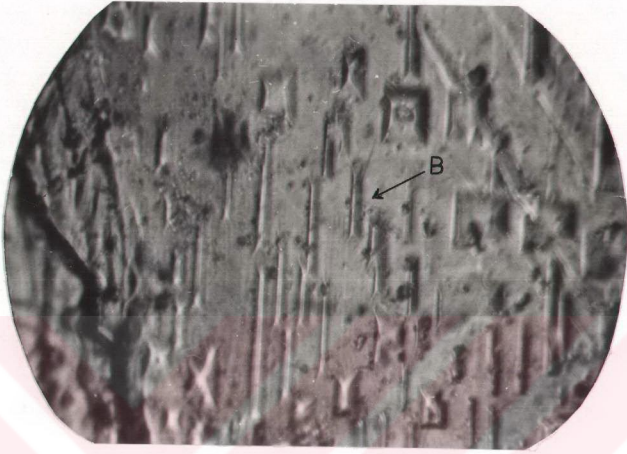
Geometrik sınırlamalar yüzünden bir dislokasyon kristal içinde sona eremez^(1,3,26). Dislokasyon ya kendi üzerinde ya da yüzeyde sona erer. Yüzeyde sona eren dislokasyonların buldukları yerlerde, dağlama sonucunda, dağlama çukurcukları veya dağlama tepcikleri oluşur. Bu çukurcuk veya tepciklerle dislokasyonlar arasında birebir tekabül vardır.

Bir dislokasyonun bulunduğu kısım ile bu dislokasyonu çevreleyen kristal birbirinden farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip iki bölgeye ayrılır (Şekil 4.3). Çünkü kristalde var olan safsızlıklar dislokasyon çizgisi etrafında toplanırlar.

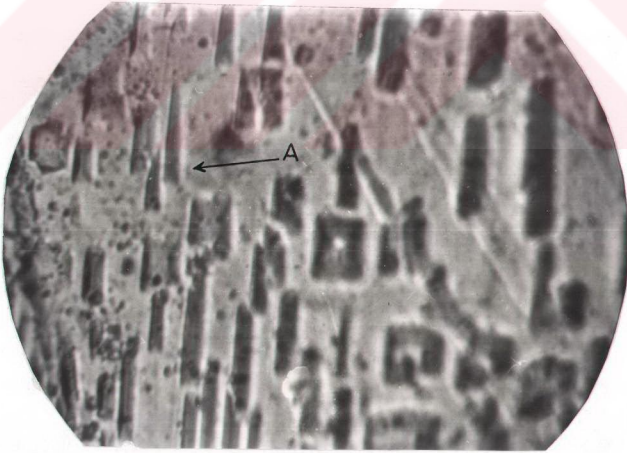


Şekil 4.3. Kystal yüzeyinde sona eren bir dislokasyonun bulunduğu yerde dağlama çukurcuklarının oluşumu, a) kenar dislokasyonu b) vida dislokasyonu.

Dağlama çözeltileri kristal yüzeyi ile temas ettiğinde, dislokasyonun zorlanma alanı, örgü distorsiyonu, dislokasyon tipi ile ilgili düzlemlerin geometrisi ve dislokasyon etrafında toplanmış bulunan safsızlıklar nedeniyle, dislokasyonun ortaya çıktığı yüzey etrafındaki atomların yer değiştirmeleri farklı olur. Eğer atomların yer değiştirmeleri hızlı gerçekleşiyorsa, dislokasyonun yüzeye çıktığı yerlerde belli geometrilerde dağlama çukurcukları oluşur. Yer değiştirme yavaş gerçekleşiyorsa dağlama tepecikleri oluşur. Bu çukurcuk veya tepeciklerin büyüklüklerinde dağlama solüsyonundaki kimyasal bileşimlerin büyük etkisi olmaktadır. Bu çalışmada, dağlama solüsyonu içinde 40 C° ve 80 C° llerde çekme işlemine tabi tutulan 11 ve 13 nolu kristallerden elde edilmiş tipik dağlama çukurcukları şekil 4.4 de görülmektedir.

20 μ

a

20 μ

b

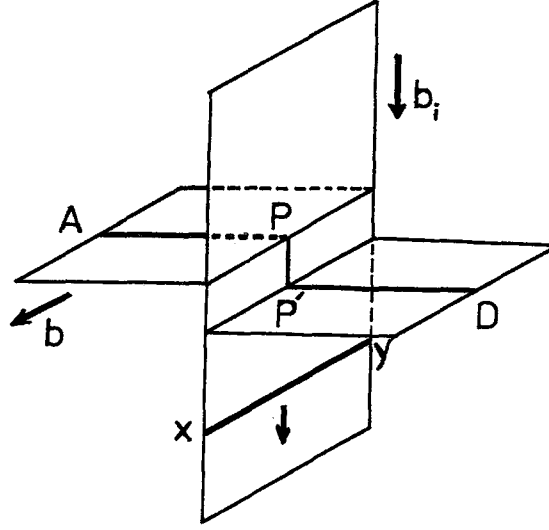
Şekil 4.4 a) 11, b) 13 nolu kristallerden çekilen fotoğraflar üzerinde dağlama çukurcuklarının görünüşü.

Bir dislokasyon dağlama solüsyonu içinde çekme işlemleri ile hareket ettiğinde, hareket hattı boyunca devamlı bir şekilde dağlama çukurcuğu veya dağlama tepesi izleri oluşturur. Mevcut çalışmada dağlama solüsyonu içinde çekme işlemine tabi tutulan 11, 12, 13 nolu kristallerden çekilmiş fotoğraflar üzerindeki piramit şeklindeki çukurcuklar hareketsiz, ince uzun ve bir yada iki tarafında piramit şeklinde çukurcuk bulunan izler hareket etmiş dislokasyonlara karşılık gelmektedir (Şekil 4.4). Bu dağlama çukurcuklarının izlerinden hareketle ortalama dislokasyon hızları için, 11 nolu kristalde $0.97 \times 10^{-6} \pm 0.42$, 12 ve 13 nolu kristaller için sırasıyla, $2.695 \times 10^{-6} \pm 0.11$ ve $3.273 \times 10^{-6} \pm 0.26 \text{ ms}^{-1}$ değerleri hesaplanmıştır. Görüldüğü gibi kristallere uygulanan zor, sadece dislokasyon yoğunluğunu artırmakla kalmayıp, onların hızını da önemli derecede artırmaktadır.

4.6. Dislokasyon Üzerine Etki Eden Kimyasal Kuvvetin Hesaplanması

Aynı kayma düzleminde olmayan dislokasyonlar kesiştikleri zaman her birinin üzerinde diğerinin Burgers vektörüne paralel ve uzunluğu onun şiddetine eşit bir basamak hasil olur. Bu basamak dislokasyonu bir kayma düzleminde diğerine geçirir. Jog adı verilen bu basamak dislokasyonun tırmanmasına karşılık gelir (Şekil 4.5) ve boşluklar (vacancies) bu joglarda meydana getirilir.

Termal dengede, atomların bir jogda yer alması veya jogu terketmeleri aynı frekanstadır. Ancak boşluk konsantrasyonunun herhangi bir şekilde artması durumunda bir jog'a boşlukların varma oranı artar. Böylece fazladan yarı düzlem ihtiva eden bir kenar dislokasyonunun fazladan yarı düzlemi daralır. Bu sebeple, artan boşluk konsantrasyonunun dislokasyonun tırmanma hareketi için, dislokasyon üzerine osmotik kuvvet adı verilen bir kuvvet oluşturduğu düşünülür.



Şekil 4.5 XY dislokasyonunu AD dislokasyonu kesmiş ve AD dislokasyonu PP' jog'una sahip olmuştur. PP' jog'u b_i yönünde ve büyüklüğüne sahiptir.

Şekil 4.5 de görüldüğü gibi kayma hareketi yapan dislokasyon, diğer bir dislokasyonla kesişmiş ve tırmanma hareketine geçmiştir. Tırmanma hareketi noktasal kusurların (ara yer atomları veya boşluklar) meydana getirilmesi veya yokedilmeleri ile mümkün olduğundan, bu oluşum yada yokolma kristale dışardan enerji verilmesini gerektirir^(3,27). Bu yüzden tırmanma hareketini sadece dış kuvvetlerle (elastik kuvvetler) başlatmak oldukça uzak bir ihtimaldir. Bu sebeple dislokasyonun tırmanma hareketine geçebilmesi için elastik kuvvetlere ilaveten osmotik kuvvetinde dislokasyon üzerine etki etmesi gerekmektedir.

Böylece dislokasyona tırmanma hareketi esnasında etkiyen toplam kuvvet kesim 2.9.2 de belirtildiği gibi l uzunluğu başına,

$$F/l = F_{osm.}/l + F_{el.}/l \quad (4.3)$$

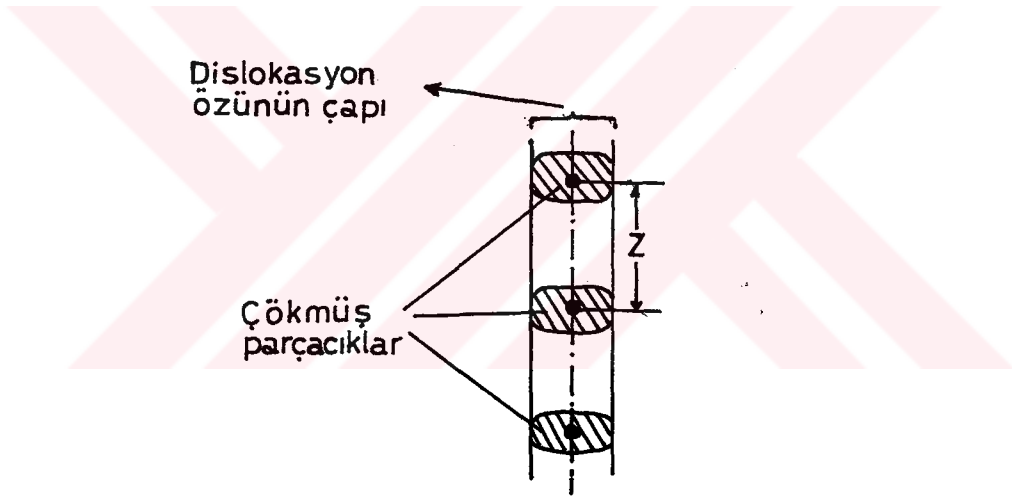
ifadesi ile verilmiştir. Bu ifade açık bir biçimde,

$$F/l = -kTb_e \ln(N_v/N_v^0)/v_A - \sigma b \quad (4.4)$$

şeklinde yazılabilir. Kimyasal kuvvet veya termodinamik adı verilen bu ifadedeki N_v^0 dislokasyon özü (core) civarındaki boşlukların, N_v ise dislokasyondan çok uzaklardaki boşlukların konsantrasyonudur. E_i , bir kenar dislokasyonu ile bir atomik boşluğun etkileşme enerjisi olmak üzere, dislokasyon özü (Şekil 4.6) civarındaki boşlukların konsantrasyonu, dislokasyondan uzak yerlerdeki boşluk konsantrasyonuna,

$$N_v = N_v^0 \exp(-E_i/kT) \quad (4.5)$$

ifadesi ile bağlıdır.



Şekil 4.6 Dislokasyon çizgisinde çökelmeleri tartışmak için bir model. Çökelen parçacıklar arasındaki uzaklık Z olup, dislokasyon öz bölgesi (core region) gaz şeklinde uniform konsantrasyona sahiptir.

E_i etkileşme enerjisi, r uzaklığında bir noktasal kusurun dislokasyon özüne yerleşmesi durumunda (tırmanma hareketi) yarıçapında ϵ kadarlık bir değişime karşılık, dislokasyonun zor alanına karşı yapılan işe eşittir.

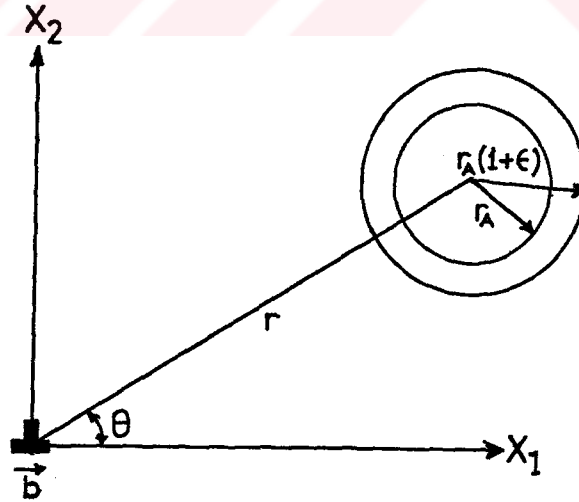
E_i etkileşme enerjisi Cottrell⁹, Bullough ve Newman⁴³ tarafından, bir kenar dislokasyonu ve bir noktasal kusur arasındaki (Şekil 4.7) birinci mertebeden etkileşme dikkate alınarak

$$E_i = -A/(r^2 + r_c^2)^{1/2} \quad (4.6)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Burada A , Cottrell etkileşme parametresi olup,

$$A = 4/3 (1 + \gamma) G b r_A^3 \epsilon / (1 - \gamma) \quad (4.7)$$

ifadesi ile verilmiştir. Bu ifadede γ Poisson oranı, G makaslama modülü, r dislokasyondan olan uzaklık, r_c dislokasyon özünün yarıçapı, b Burgers vektörü, $r_A(1+\epsilon)$ noktasal kusurun son yarı çapı, $4/3 \pi r_A^3 = v_A$ atomik hacimdir. Denklem 4.6 da r_c nin varlığı, $r = 0$ olsa bile noktasal kusur ile dislokasyon arasında etkileşme olabileceğini göstermektedir.



Şekil 4.7 Bir kenar dislokasyonu ile bir noktasal kusur arasındaki etkileşme.

Dislokasyon x_3 eksenini boyunca uzanırken, noktasal kusur $x_1 = r \cos \theta$, $x_2 = r \sin \theta$, $x_3 = \text{sbt.}$ koordinatlarında yer almaktadır.

Etkileşmenin dislokasyonun özünde ($r = 0$) olduğunu varsayarak, E_i etkileşme enerjisi, Cottrell etkileşme parametresi de dikkate alınarak,

$$E_i(r) = [4/3 (1+\gamma) Gbr_A^3 \epsilon / (1-\gamma)] / r_c \quad (4.8)$$

şeklinde yazılabilir. Etkileşme enerjisi denklem 4.5'deki boşluk konsantrasyonu ifadesinde yerine konulduğunda l uzunluğundaki bir dislokasyon parçasına etkileyen kimyasal kuvvetin osmotik bileşeni için,

$$F_{osm.}/L = -[(1 - \gamma) Gb^2 \epsilon] / (1 - \gamma) \pi r_c \quad (4.9)$$

ifadesi elde edilir.

Bu çalışmada gözlenen Burgers vektörlerinin büyüklükleri ile Yoğurtçu ve Sanders⁴⁴ tarafından hesaplanan makaslama modülü değeri alınarak, osmotik kuvvet, elastik kuvvet ve kimyasal kuvvet hesaplanmış ve tablo 4.2 de verilmiştir. Osmotik kuvvetin değeri hesaplanırken, ϵ ve r_c için kesin değerler olmadığından Wagner et al.²⁴ in teklif ettiği gibi r_c için $b - 5b$, ϵ için $0.06 - 0.2$ değerleri aralığı dikkate alınarak hesaplama yapılmıştır.

Tablo 4.2 Kristaller için hesaplanan osmotik, elastik ve kimyasal kuvvet değerleri.

Kristal No	$F_{osm./l}$ Nm^{-1}	$F_{el./l}$ $\times 10^{-3} Nm^{-1}$	$F_{kim.}$ Nm^{-1}	Sıcaklık $^{\circ}C$
1	0.06-1.16	3.59	0.06-1.16	20
2	0.02-0.46	0.81	0.02-0.46	20
3	0.01-0.31	0.55	0.01-0.31	20
4	0.06-1.16	3.23	0.06-1.16	20
5	0.02-0.47	0.83	0.02-0.47	20
6	0.06-1.16	3.39	0.06-1.16	20
7	0.06-1.16	2.95	0.06-1.16	20
8	0.06-1.16	3.09	0.06-1.16	20
9	0.06-1.43	2.89	0.06-1.43	20
10	0.06-1.16	2.16	0.06-1.16	20
11	0.06-1.16	4.41	0.06-1.16	40
12	0.08-1.43	5.69	0.08-1.43	60
13	0.06-1.16	7.18	0.06-1.16	80

5. TARTIŞMA

Büyütülen ilk 10 kristal oda sıcaklığında büyüme doğrultuları boyunca çekme işlemine tabi tutulmuşlardır. Çekme işlemi sonucunda kristal yüzeylerinde oluşan kayma bandları gözlenmiş ve kristaller üzerinde büyüme doğrultuları ile kayma bandları arasındaki açılar metal mikroskobu altında ölçülmüştür. Bu açılardan yararlanarak kristaller için teşkil edilen kayma sistemleri tablo 4.1 de görülmektedir.

Kesim 2.3 de kristallerdeki kayma sistemlerinin rastgele olamayacağı vurgulanmıştır. Dislokasyon teorisi, kayma düzlemlerinin oluşumunda en düşük yığın kusur enerjisine sahip, zayıf atomik bağlı ve düzlemler arası mesafesi büyük olan düzlemler üzerinde kaymanın daha kolay gerçekleştiğini göstermektedir^(3,25,26). Çünkü bu düzlemler üzerinde kaymayı engelleyen Pierls zoru en küçük değere sahiptir. Kayma doğrultusu olarakta, örgüde en küçük büyüklüğe sahip bir kaç Burgers vektörü yönünde kaymanın gerçekleştiği yine dislokasyon teorisi tarafından belirtilmiştir.

İdeal c/a oranına sahip hekzagonal kristallerde biraz önce bahsedilen şartları sağlayan kayma düzlemi (0001), kayma doğrultusu ise $[11\bar{2}0]$ doğrultusu olup, bu düzlem ve doğrultular sıkı paketlenmiş düzlem ve doğrultulardır. Ancak hekzagonal yapıdaki kristallerde c/a oranının kristalden kristale farklı olması sebebiyle düzlemler arası mesafeler, aynı indisli düzlemler için bile kristalden kristale farklılık göstermektedir. Nitekim ideal c/a oranından oldukça uzak bir değere sahip Zn ve Cd kristallerinde düzlemler arası mesafesi en büyük olan düzlemler (0001) iken ideal c/a oranına oldukça yakın bir değere sahip Re kristalinde $(10\bar{1}0)$ düzlemlerinin düzlemler arası mesafesi en büyüktür. Bu tartışmadan da anlaşılacağı üzere hekzagonal yapıdaki kristallerde kayma düzlemlerinin oluşumunda c/a oranı etkili olmaktadır.

Tablo 5.1 de hekzagonal yapıya sahip kristallerde c/a oranları ve oda sıcaklığında elde edilmiş kayma sistemleri gösterilmiştir. Tablodan da görüleceği gibi c/a oranının değişmesiyle kristallerdeki kayma sistemleride değişmektedir.

Tablo 5.1 Hekzagonal kristallerde c/a oranının kayma sistemleri üzerine etkisi²⁵.

Kristal	c/a	Düzlemler Ara. Mes. En Küçük Düz. İndis	Aktif Kayma Sistemi
Cd	1.89	(0001)	(0001)[11 $\bar{2}$ 0]
Zn	1.86	(0001)	(0001)[11 $\bar{2}$ 0]
Mg	1.62	(0001)	(0001)[11 $\bar{2}$ 0]
Co	1.62	(0001)	(0001)[11 $\bar{2}$ 0]
Re	1.62	(0001) (10 $\bar{1}$ 0)	(0001)[11 $\bar{2}$ 0] (10 $\bar{1}$ 0)[11 $\bar{2}$ 0]
Ti	1.59	(10 $\bar{1}$ 0)	(10 $\bar{1}$ 0)[11 $\bar{2}$ 0]
Zr	1.59	(10 $\bar{1}$ 0)	(10 $\bar{1}$ 0)[11 $\bar{2}$ 0]
Yt	1.57	(10 $\bar{1}$ 0)	(10 $\bar{1}$ 0)[11 $\bar{2}$ 0]

Hekzagonal kristallerde elde edilen kayma düzlemleri üzerinde en aktif yani en küçük büyüklüğe sahip Burgers vektörü $[11\bar{2}0]$ doğrultusudur. Berghzan et al.⁴⁵ in yapmış oldukları deneyler, Cd ve Zn kristallerinde (0001) basal düzlem dışında, prizmatik (1 $\bar{1}$ 00) ve pramidal (10 $\bar{1}$ 1) düzlemlerinin uygun kayma düzlemleri ve bu düzlemler üzerinde $[11\bar{2}3]$ ve $[\bar{1}\bar{1}23]$ doğrultularına sahip Burgers vektörlerinin aktif olduklarını göstermektedir. Tablo 4.1 den de görüleceği üzere bu çalışmada bulunan kayma düzlemleri ve kayma doğrultuları, (0001) basal düzlem üzerinde $[11\bar{2}0]$ sıkı paketlenme yönünde ortaya çıktığı gibi basal düzlem dışında prizmatik ve pramidal düzlemler üzerinde de kayma meydana gelmiştir. Bu durum kristallerde kayma düzlemlerinin oluşumunun, sadece sıkı paketlenme düzlemi üzerindeki en az değere sahip Pierls zoruna bağlı olmadığını diğer bazı şartlarında kayma sistemlerinin oluşumunda etkili olduğunu göstermektedir. Bu etkilerin, kristallerin zorlanma hızı, saflığı ve büyütme şartları olabilecekleri düşünülebilir. Mevcut çalışmada Cd monokristali için elde edilen kayma sistemleri ve çeşitli araştırmacılar tarafından oda sıcaklığında elde edilen kayma sistemleri (Tablo 2.1) bu neticeleri doğrulamaktadır.

Andrade ve Chow⁴⁶, T/T_m oranının artmasıyla (T_m kristalin erğime sıcaklığı) kayma düzlemlerinin değiştiğini ve bazı kayma sistemlerinin oldukça sık bir şekilde ortaya çıktığını göstermişlerdir. Adı geçen araştırmacılar bu durumu, kayma düzlemleri üzerindeki Pierls zoruna ve yayılmış dislokasyonların yeniden bir araya gelmelerinin sıcaklığa bağımlılığı ile açıklamışlardır. Bu çalışmada 60 ve 80 C° lerde çekme işlemine tabi tutulan 12 ve 13 nolu kristallerde, oda sıcaklığında çekme işlemine tabi tutulan kristallerden farklı olarak, (11 $\bar{2}$ 2) [$\bar{1}\bar{1}$ 23] kayma sistemi ortaya çıkmıştır. Aynı kayma sistemi Fukutomi et al.³⁸ in Cd üzerinde 400 K de yapmış oldukları çalışmalarda da bulunmuştur. Aynı araştırmacılar, pramidal kayma II adını verdikleri bu kayma sisteminin sıcaklıkla birlikte en aktif kayma sistemi olduğu ve bu sıcaklıkta bu kayma sistemi üzerindeki kritik makaslama zorunun, basal kayma düzlemi üzerindeki kritik makaslama zorundan on kat daha büyük olduğunu bulmuşlardır.

Oda sıcaklığında çekme işlemine tabi tutulan ilk on kristal için elde edilen çekme uzama eğrilerinden yararlanarak hesaplanan σ_k kritik makaslama zoru değeri ortalama olarak $5.4 \times 10^6 \pm 0.24 \text{ Nm}^{-2}$ olarak hesaplanmıştır (Tablo 4.1). Bu değerler Tsivinkii⁴⁷, Jackson⁴¹ ve Erdoğan vd.⁴⁸ nın bulmuş olduğu değerlerle aynı, Fukutomi et al.³⁸ in bulmuş olduğu değerlerden bir miktar büyüktür. 40, 60 ve 80 C° lerde çekme işlemine tabi tutulan 11, 12, 13 nolu kristallerde σ_k kritik makaslama zoru değerleri sırasıyla 8.96×10^6 , 9.4×10^6 ve $14.6 \times 10^6 \text{ Nm}^{-2}$ olarak hesaplanmıştır. Görüldüğü gibi sıcaklığın artmasıyla σ_k kritik makaslama zoru değerleri de artmaktadır. Bu durum sıcaklığın artması ile noktasal kusurların artması ve deformasyonla birlikte dislokasyon yoğunluğundaki artış ile açıklanabilir. Ojima⁴⁹ tarafından bir çalışmada da belirtildiği gibi kristalleşmiş bir madde de, kayma düzlemi üzerindeki noktasal kusurlarla dislokasyonların, dislokasyon -dislokasyon ve dislokasyon - noktasal kusur etkileşmesi neticesi maddenin esneklik sınırının yükseldiği bilinmektedir. Görüldüğü gibi uygulanan zor sadece dislokasyon yoğunluğunu artırmakla kalmayıp aynı zamanda kristalin σ_k kritik makaslama zoru değerlerini de artırmaktadır.

Yine tablo 4.1 den görüleceği gibi farklı büyüme doğrultularına sahip bazı kristallerde aynı kayma sistemlerinede rastlanmaktadır. Bu durum, kristallerin büyüme doğrultularının kayma sistemleri üzerine bir etkisinin olmadığını göstermektedir.

11, 12, 13 nolu kristaller sırasıyla 40, 60, 80 C° lik sıcaklıklarda büyüme doğrultuları

boyunca, dağlama solüsyonu içinde çekme işlemine tabi tutulmuşlardır (kesim 3.5.2). Çekme işlemi sonucunda kristal yüzeylerinde, dislokasyonların buldukları yerlerde çeşitli uzunluklarda dağlama izleri elde edilmiştir. Bu izler görünüş bakımından iki tipe ayrılır. Bunlardan birincisi bir ucunda bir çukurcuk bulunan ve sabit hızla hareket ederken dağlama bitmeden duran bir dislokasyonu gösteren A tipidir. Bu tip aynı zamanda zor uygulanmadan önce hareketi yüzeyde sonuçlanan bir dislokasyona ait izdir. İkinci tip iz ise B tipi iz olup, bu iz zor uygulandığında içerden dışarıya çıkan ve yüzeyde iki ucunda da çukurcuk bulunan bir dislokasyonun yerini göstermektedir. Dislokasyonların yerlerine karşılık gelen bu izler şekil 4.4 de A ve B okları ile gösterilmiştir.

Dağlama solüsyonu içinde çekme işlemine tabi tutulan 11, 12, 13 nolu kristal yüzeylerinde oluşan dağlama çukurcuk izlerinden hareketle, 40 C° sıcaklıkta çekme işlemine tabi tutulmuş 11 nolu kristal için ortalama dislokasyon hızı $0.987 \times 10^{-6} \mp 0.42 \text{ ms}^{-1}$ 60 ve 80 C° lerde çekme işlemine tabi tutulan 12 ve 13 nolu kristaller için ortalama dislokasyon hızları sırasıyla $2.695 \times 10^{-6} \mp 0.11 \text{ ms}^{-1}$ ve $3.273 \times 10^{-6} \mp 0.26 \text{ ms}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır.

Dislokasyonun Burgers vektörü kayma düzleminin içinde ise dislokasyon kayma ile hareket eder. Bu kayma hareketi esnasında dislokasyon hızları uygulanan makaslama zorunun, kristal saflığının ve sıcaklığın bir fonksiyonudur. Cd kristali üzerinde yapılan çalışmalar, dislokasyonları kaydırmak için gereken kritik makaslama zor değerinin 1MPa'ın altında olduğunu göstermektedir⁵⁰. Dolayısıyla bu değer üzerinde uygulanan zorlar dislokasyon hızını artıracaktır. Yapılan deneysel çalışmalar, ortalama dislokasyon hızının uygulanan zora bağımlılığını sabit sıcaklıkta $v = (\tau/\tau_0)^n$ ifadesi ile bağılı olduğunu göstermektedir. Burada τ uygulanan zor, τ_0 ve n kristalden kristale farklı olan ve deneylerle elde edilen sabit değerlerdir. İfadeden de anlaşılacağı üzere uygulanan zor arttıkça ortalama dislokasyon hızıda artacaktır.

Kristal saflığında ortalama dislokasyon hızı üzerinde büyük etkisi vardır. Zira dislokasyonunun kayma düzlemindeki hareketleri, kirlilik atomları, noktasal kusurlar ve dislokasyonlar tarafından engellenir. Dislokasyonun bu engellerden kurtulması ve hızlanması için uygulanan zorun veya sıcaklığın artırılması gerekmektedir.

Yapılan deneysel çalışmalar düşük sıcaklıklarda termal aktivasyon yerine dislokasyonların kayma düzlemindeki engellerden tünelleme etkisi ile de kurtularak uygulanan zorun etkisi

altında hızlandıklarını göstermektedir. Bu durumda ortalama dislokasyon hızı

$v = A \exp(-\beta\mu/\tau)$ ifadesi ile verilmektedir⁵⁰. Bu ifade de β ve A sabit olup, μ makaslama modülü τ ise uygulanan zordur. Aynı zamanda noktasal kusurların termal titreşimi, etkin etkileşme enerjisini artırmakta ve dislokasyon hızının sıcaklığa bağımlılığını artırmaktadır. Nitekim 40, 60, 80 C° lerde çekme işlemine tabi tutulan 11, 12, ve 13 nolu kristallerde ortalama dislokasyon hızında bir artış meydana gelmiştir. Çünkü 40 C° sıcaklıkta çekme işlemine tabi tutulan 11 nolu kristale uygulanan kritik makaslama zoru $8.96 \times 10^6 \text{ Nm}^{-2}$, 60 ve 80 C° lerde çekme işlemine tabi tutulan 12 ve 13 nolu kristallerde kritik zor değerleri ise sırasıyla 9.4×10^6 ve $14.6 \times 10^6 \text{ Nm}^{-2}$ dir. Gerek sıcaklığın artması gerekse uygulanan kritik makaslama zorundaki artış, ortalama dislokasyon hızında bir artış meydana getirmiştir.

Dislokasyonun Burgers vektörü kayma düzlemine dik ise dislokasyon tırmanma adı verilen bir hareketle kayma düzleminin dışına hareket eder. Bu hareket esnasında kristalde hacim değişimi söz konusudur. Bu hareketin gerçekleşebilmesi için kristale büyük miktarda enerji verilmesi gerekmektedir. Bu sebeple dislokasyonu sadece dışarıdan uygulanan dış kuvvetlerin dislokasyon üzerine etki ettirdiği elastik kuvvetlerle başlatmak oldukça uzak bir ihtimaldir. Ancak kristal içindeki noktasal kusurların dislokasyon üzerine uyguladıkları osmotik kuvvet ile dislokasyonlar tırmanma hareketi yapabilmektedirler. Nitekim tablo 4.2 de de görülebileceği gibi kristaller için hesaplanan osmotik kuvvet değerleri, elastik kuvvet değerlerinden 10 ile 1000 kat daha büyüktür. Dolayısıyla tırmanma hareketi için etkin kuvvetin osmotik kuvvet olduğu anlaşılmaktadır.

Bu çalışmada hesaplanan osmotik kuvvet değerlerini karşılaştırmak için özellikle metal kristaller için hesaplanmış bir değere rastlanılmamış ancak Wagner et al.²⁴ nın çinko blend yapıda kristalleşen GaP üzerinde yapmış oldukları çalışmalarında elastik kuvvet için yaklaşık 0.02 Nm^{-1} , osmotik kuvvet için ise $0.19 - 0.32 \text{ Nm}^{-1}$ değerlerini bulmuşlardır. Bu değerlerin karşılaştırılmasından da anlaşılacağı üzere tırmanma hareketinde etkin kuvvet osmotik kuvvettir.

Dislokasyon tırmanma hareketi yaparken, dislokasyon üzerine etkiyen toplam kuvvet yani kimyasal kuvvet tablo 4.2 den de görülebileceği gibi sadece osmotik kuvvetten meydana gelmektedir.

Kimyasal kuvvetin elastik bileşeni sıcaklıktan bağımsız olup, osmotik bileşeni sıcaklık ve

çekme zorları neticesinde artan noktasal kusur konsantrasyonuna bağımlı gözükmektedir (denklem 4.4). Ancak dislokasyon çizgisi civarındaki noktasal kusur konsantrasyonunu veren ifade (denklem 4.5) osmotik kuvvet bileşeninde yerine konulursa, osmotik kuvvetin sıcaklıktan bağımsız hale geldiği görülür. Dolayısıyla osmotik kuvvet ve kimyasal kuvvet sıcaklıktan bağımsız olarak gözükmektedir. Dislokasyon ve noktasal kusurlar arasındaki etkileşmeler, etkileşme enerjisi ve dislokasyon - noktasal kusur arasındaki uzaklığa bağlıdır^(43,51). Dolayısıyla bu etkileşmenin büyüklüğü kimyasal kuvveti değiştirir. Tırmanma hareketinde noktasal kusurlar dislokasyon çizgisinde olduklarından, etkileşme enerjisi uzaklıktan bağımsızdır⁴³. Ancak gerek sıcaklık artışı ve gerekse çekme zorları neticesi artan noktasal kusur yoğunluğu, dislokasyon etrafındaki iletkenlik elektronlarının yeniden düzenlenmelerini meydana getirir. Bu düzenlenme neticesinde bir elektrik dipolü meydana gelir ve bu elektrik dipolü ile dislokasyonun etkileşmesi neticesinde toplam etkileşme enerjisi % 10 civarında artar³. Bu artış kimyasal kuvvette de bir artış meydana getirir.

Sonuç olarak, modifiye Bridgman metodu ile büyütülen Cd monokristallerinde bulunan kayma sistemleri ve σ_k kritik makaslama zoru değerleri, literatürde çeşitli araştırmacılar tarafından bulunmuş değerlerle uyum içindedir. Sıcaklığın artması ile yeni bir kayma sisteminin aktif hale geldiği, sıcaklığın artması ile meydana gelen noktasal kusurların dislokasyonlarla etkileşmeleri neticesinde σ_k kritik makaslama zorunun ve ortalama dislokasyon hızlarının arttığı gözlenmiştir. Ayrıca dislokasyonu tırmanma hareketine zorlayan kimyasal kuvvetin, noktasal kusurlardan kaynaklanan osmotik kuvvetten meydana geldiği ve kimyasal kuvvetin sıcaklıktan bağımsız ancak sıcaklık değişimi ve çekme zorları neticesi artan noktasal kusur yoğunluğundan etkilendiği sonucuna varılmıştır.

Ek Açıklamalar -A

```

C   HEKZAGONAL KRISTAL SISTEMINE SAHİP KADMIYUM KRISTALİNİN
C   0001 STEREOGRAFİK İZDÜŞÜMÜ İÇİN AÇI DEĞERLERİ
      J1=0
      K1=0
      I1=0
      L1=1
      DO 5 J=-2,2
      DO 5 K=-2,2
      I=-(J+K)
      DO 5 L=-5,5
      IF(J.EQ.0.AND.K.EQ.0.AND.I.EQ.0.AND.L.EQ.0) GO TO 5
      A=(J+ 2.*K)/3.0+L/2.0
      DO 3 I=-3.5,3.5,1
      IF(A.EQ.I) GO TO 5
9  CONTINUE
      B1=((J1*J+K1*K)+.5*(J1*K+K1*J))+3.*8.8726/(4.*31.5506)*(L1*L)
      C1=(J1**2+K1**2+J1*K1+(3.*8.8726)/(4.*31.5506)*L1**2)**.5
      D1=(J**2+K**2+J*K+(3.*8.8726)/(4.*31.5506)*L**2)**.5
      A1=B1/(C1*D1)
      AC11=ACOS(A1)
      Y1=AC11*180/3.1416
      E1=J1*J+K1*K+L*L1+I1*I
      F1=(J1**2+K1**2+L1**2+I1**2)**.5
      G1=(J**2+K**2+L**2+I**2)**.5
      A2=E1/(F1*G1)
      AC12=ACOS(A2)
      V1=AC12*180/3.1416
      L2=0
      IF(Y1.GT.90.AND.V1.GT.90) GO TO 5
      WRITE (*,90) J,K,I,L,Y1,J,K,I,L,V1
90  FORMAT(1X,'0001 DÜZ.İLE',1X,4(I2),1X,'DÜZ.A.ACI=',F5.1,3X,
      D'0001 DÜG.İLE',1X,4(I2),1X,'DÜG.A.ACI=',F5.1)
      DO 5 J2=-1,1
      DO 5 K2=-1,1
      I2=-(J2+K2)
      IF(J2.EQ.0.AND.K2.EQ.0) GO TO 5
      B2=((J2*J+K2*K)+.5*(J2*K+K2*J))+3.*8.8726/(4.*31.5506)*(L2*L)
      C2=(J2**2+K2**2+J2*K2+(3.*8.8726)/(4.*31.5506)*L2**2)**.5
      D2=(J**2+K**2+J*K+(3.*8.8726)/(4.*31.5506)*L**2)**.5
      A3=B2/(C2*D2)
      IF(A3.GT.1.0) A3=1.0
      IF(A3.LT.-1.0) A3=-1.0
      AC13=ACOS(A3)
      Y2=AC13*180/3.1416
      E2=J2*J+K2*K+L*L2+I2*I
      F2=(J2**2+K2**2+L2**2+I2**2)**.5
      G2=(J**2+K**2+L**2+I**2)**.5
      A4=E2/(F2*G2)
      IF(A4.GT.1.0) A4=1.0
      IF(A4.LT.-1.0) A4=-1.0
      AC14=ACOS(A4)
      V2=AC14*180/3.1416
      IF(Y2.GT.90.AND.V2.GT.90) GO TO 5
      WRITE (*,100) J,K,I,L,J2,K2,I2,L2,Y2,J,K,I,L,J2,K2,I2,L2,V2
5  CONTINUE
100 FORMAT(1X,4(I2),'DÜZ.İLE',1X,3(I2),I2,'DÜZ.A.ACI',F5.1,1X,
      *3(I2),I2,1X,'DÜG.İLE',1X,4(I2),1X,'DÜG.A.ACI',F5.1)
      END

```

Ek Açıklamalar -B

```

C  ****KADMIYUM KRİSTALİNDE KAYMA SİSTEMLERİNİN BULUNMASI****
PARAMETER (PI=3.1416)
INTEGER U,V,W,H,K,L,ACI,A,B,C,G,T
READ*,U,V,W,ACI
G=-(U+V)
T=ACI
O=COS(T*3.1416/180.)
P=O*((U**2+V**2+W**2+G**2)**.5)
DO 5 H=(-3),3
DO 5 K=(-3),3
DO 5 L=(-3),3
M=-(H+K)
IF(H.EQ.0.AND.K.EQ.0.AND.L.EQ.0.AND.M.EQ.0) GO TO 5
Z=P*((H**2+K**2+L**2+M**2)**.5)
Y=H*U+K*V+G*M+L*W
D=(ABS(Z)-ABS(Y))
IF(D.GT.(0.2).OR.(D.LT.0)) GO TO 5
DO 6 A=(-3),3
DO 6 B=(-3),3
DO 6 C=(-3),3
N=-(A+B)
IF(A.EQ.0.AND.B.EQ.0.AND.C.EQ.0.AND.N.EQ.0) GO TO 6
S=H*A+K*B+L*C+M*N
IF(S.NE.0) GO TO 6
AI=Y
AC=([H**2+K**2+M**2+L**2]**.5)*([U**2+V**2+G**2+W**2]**.5)
AD=AI/AC
IF(AD.(T.0) GO TO 4
AY=ACOS(AD)
AG=(AY*180)/PI
AS=90-AG
GO TO 9
4 AZ=ACOS(AD)
AG=(AZ*180)/PI
AK=AG-90.
AS=AK
9 AT=COS((AG*PI)/180)
AP=COS((AS*PI)/180)
SI=AP*AT
WRITE(*,100)U,V,G,W,T,H,K,M,L,A,B,N,C,SI
100 FORMAT(2X,4(I2),1X,'BUY.DOG.ILE KAY.DOG.ARA.ACI',1X,I2,1X,'TKEN',
2X,'KAY.DOG.',1X,4(I2),1X,'DIR',5X,'BU KAY.DOG.',1X,4(I2),1X,
C'DUZ. ICINDEDIR',4X,'SCHMID CAR',F7.3)
6 CONTINUE
5 CONTINUE
END

```


KAYNAKLAR

- 1-Read, W. T., 1953, Dislocations in Crystals, New York.
- 2-Doğan, E.G., 1965, Sürekli Ortamlar Mekaniği, P.V. I-V-15, İstanbul.
- 3-Hull, D., 1965, Introduction to Dislocations, Pergamon Press.
- 4-Chockley, W. and Read, W.T., 1949, Phys. Rev., 75, 692.
- 5-Batterman, B.W., 1957, J. Appl. Phys., 28, 1236.
- 6-Elam, C.F., 1936, The Distortion of Metal Crystals, Oxford.
- 7-Schmid, E. and Boas, W., 1936, Kristalplastizitat, Berlin.
- 8-Bilby, B.A., 1950, J.Inst. Metals, 76, 613,
- 9-Cottrell, A.H., 1953, Dislocations and Plastic Flow in Crystals, Oxford.
- 10-Glen, W., 1956, Philos. Mag.,1, 400.
- 11-Frank, F.C., 1949, Physica, 15, 131.
- 12-Tyapunina, N.A., Naimi, E.K., Gasparyan, S.V. and Zinenkova, G.M., 1978
Phys. Stat. (a), 46, 411.
- 13-Hyaguji, M., Ogawa, T. and Nittono, O., 1984, Transactions of the Japan Institute of
Metals, 7, 447.
- 14-Johnston, W.G. and Gilman,J.J. 1957, Dislocations and Mechanical Properties of
Crystals, Wiley.
- 15-Honda, K., Hirokawa, T. and Yomogita, K., 1972, Jpn. J. Appl. Phys., 9, 1210.
- 16-Kocks, U.F., 1965, Philos. Mag., 12, 541.
- 17-Foreman, A.J.F. and Makin, M.J., 1966, Philos. Mag., 14, 911.
- 18-Marukawa, K. 1967, Jpn. J. Appl. Phys., 22, 499.
- 19-Düzgün, B., 1985, β -Sn Monokristalinde Noktasal Kusurların Dislokasyon Üzerine
Etkisi ve Zorlanma Tensörünün Hesaplanması. Doktora Tezi, Atatürk
Üni. K.K.Eğt. Fak. Erzurum (Yayınlanmamış).
- 20-Walukiewicz, W., 1989, Phys. Rev., 39, 12,8776.
- 21-Mott, N.F., 1951, Proc. Phys. Soc. B64, 729.
- 22-Bardeen, J. and Herring, C., 1952, Imperfection in Nearly Perfect Crystals, p. 279
New York.
- 23-Thibault - Deseaux, J., Kirchner, O.H. and Putaux, J.L., 1989, Philos. Mag. A, 60
(3), 385.
- 24-Wagner, G., Paufler, P. and Rotsch, P., 1989, Philos. Mag. A, 60 (4), 507.
- 25-Hirth, J.P. and Lothe, J., 1982, Theory of Dislocations, New York.
- 26-Wertman, J. and Wertman, J., 1965, Elementary Dislocation Theory, New York.
- 27-Durlu, T.N., 1989, Katihal Fiziğine giriş, Ankara Üni. Fen Fak., Ankara.

- 28-Cullity, B.D., 1956, Elements of X-Ray Diffraction, Addison - Wesley.
- 29-Nye, J.F., 1979, Physical Properties of Crystals, Oxford.
- 30-Schmid, E. and Boas, W., 1957, Plasticity of Crystals, London.
- 31-Barret, C.S., 1952, Structure of Metals, New York.
- 32-Maddin, R. and Chen, N.K., 1954, Prog. Metal Phys., 5, 53.
- 33-Clarebrough, L.M. and Hargreaves, M.E., 1954, Prog. Metal Phys., 8, 1.
- 34-Gilman, J.J., 1961, Trans. Met. Soc., 221, 456.
- 35-Price, P.B., 1953, Electron Microscopy and Strength Crystals, New York.
- 36-Chernov, V.M. and Savin, M.M., 1976, Phys. Stat. Sol.(a), 38, 761.
- 37-Chernov, V.M., Savin, M.M. and Stroková, A.M., 1976, Phys. Stat. Sol.(a), 35, 747.
- 38-Fukutomi, H., Takatori, H. and Horiuchi, R., 1982, Transactions of the Japan Institute of Metals, 23, 10, 579.
- 39-Peach, M. and Koehler, J.S., 1950, Phys. Rev., 80, 436.
- 40-Handbook of Chemistry and Physics, 1961, 61 rd edition, CRC Press.
- 41-Jackson, P.J., 1977, Philos. Mag., 35, 4, 963.
- 42-Aytaş, I., 1978, Doçentlik Tezi, Erzurum (Yayınlanmamış).
- 43-Bullough, R. and Newman, R.C., 1970, Rep. Prog. Phys., 33, 101.
- 44-Yoğurtçu, Y.K. and Sounders, G.A., 1985, J. Phys. Chem. Solids., 47, 4, 421.
- 45-Berghezan, A., Fourdeux, A. and Amelinckx, S., 1961, Acta Metalurgia, 9, 464.
- 46-Andrade, C. and Chow, Y.S., 1940, Proc. Roy. Soc., 175A, 290.
- 47-Tisiviskii, S.V., 1976, Phys. Stat. Sol.(a), 36,11.
- 48-Erdoğan, H., Düzgün, B. ve Atıcı, Y., 1988, Doğa Tu. Fiz. ve Astrofiz. D. 12, 2, 129.
- 49-Ojima, K., 1981, Jpn. J. Appl. Phys. 20, 1657.
- 50-Kovacs, I. and Zsoldos, L., 1973, Dislocations and Plastic Deformation, Oxford.
- 51-Meisel, L.V., 1967, Journal Appl. Phys. 38, 12, 4780.