به نام خدا

مرکز دانلود رایگان
مهندسی متالورژی و مواد

www.Iran-mavad.com

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

سطوح بلوری و ساختار میکروسکوپی

اصولاً سه نوع مختلف سطوح مشترک در سیستم های فلزی اهمیت دارد:

۱- سطح آزاد یک بلور (سطح مشترک جامد و بخار)

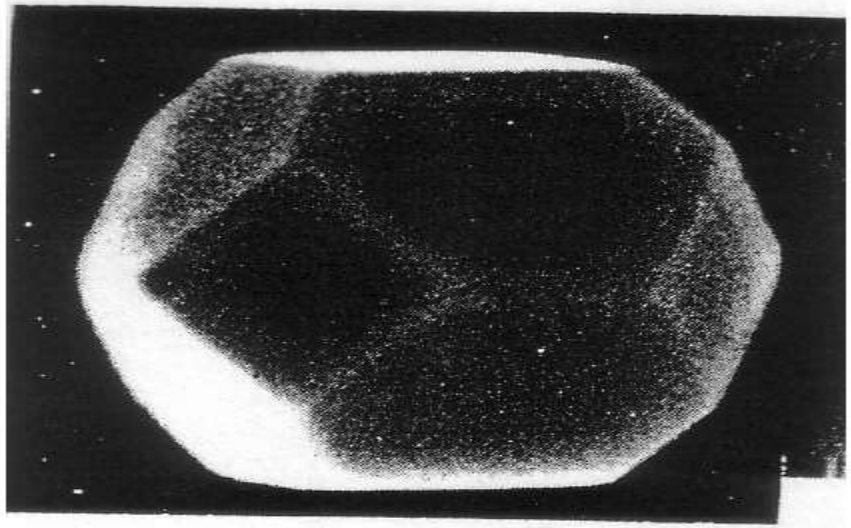
۲-مرز دانه ها (سطح مشترک α/α)

۳- سطح مشترک بین فازها (سطح مشترک α/β)

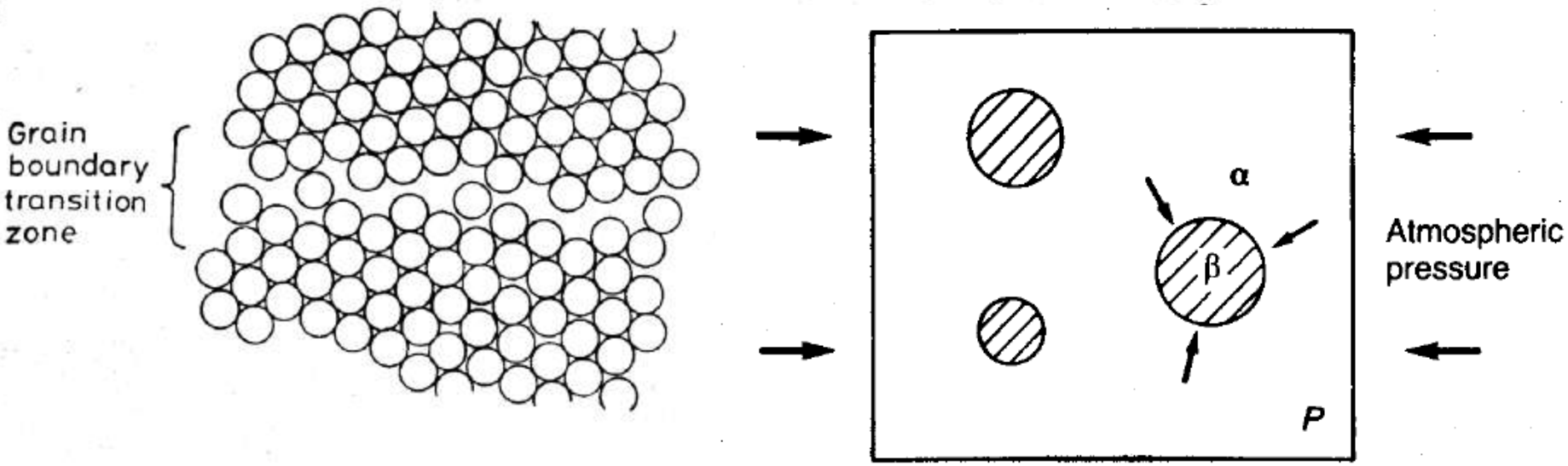
تمام بلورها سطوح نوع اول را دارند. نوع دوم ، بلورهایی با ترکیب و ساختار بلوری یکسان، ولی جهات ***فضایی***[1] متفاوت را از همدیگر متمایز می کند. سطح مشترک سوم، دوفاز مختلف دارای ترکیب و یا ساختار بلوری متفاوت را از همدیگر جدا می کند. بنابراین سطوح مشترک بین فاز جامد و مایع را نیز دربرمی گیرد.

بیشتر دگرگونی های فازی در فلزات براثر رشد جدید (β) از تعدادی مکان های هسته گذاری در درون فاز مادر (α) انجام می شود- یک فرآیند هسته گذاری و رشد. بنابراین این سطح مشترک α/β نقش بسیار مهمی در تعیین سینتیک دگرگونی های فازی برعهده دارد و مهمترین نوع سطوح از فهرست معرفی شده در بالا است. به هرحال این سطح از پیچیده ترین و ناشناخته ترین سطوح است، درنتیجه این بخش از کتاب با اولویت سطوح ساده تر از نوع اول و دوم آغاز می شود.

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد



a. The free surface of a crystal (solid/vapour interface) [from Murr].



b. Grain boundaries (α/α i

c. Interphase interfaces (α/β interfaces) [P&E].

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

سطح مشترک جامد/ بخار در بررسی پدیده تبخیر و یا میعان اهمیت دارد، در حالی که مرزهای دانه در تبلور مجدد مهم است که یک تبدیل و دگرگونی در دانه هایی با ساختار به شدت تغییر شکل یافته به دانه های جدید بدون تغییر شکل یافته است. با وجود اینکه هیچگونه فاز جدیدی در **پدیده تبلور مجدد پدیدار نمی شود، ولی جنبه های مشترک زیادی با دگرگونی های فازی دارد.**

اهمیت این سطوح مشترک محدود نمی شود به آنچه که دگرگونی اولیه می نامند . از آنجا که سطوح مشترک از ویژگی های تقریباً اساسی ساختار دگرگون یافته است دومین گام (آرام تر) در بیشتر دگرگونی ها، درشت شدن ریز ساختار و رشد دانه ها بوده که با گذشت زمان رخ می دهد. این دقیقاً مانند رشد دانه پس از دگرگونی تبلور مجدد است.

۱-۳ انرژی آزاد سطوح

صحبت از انرژی سطوح مشترک رایج است. در واقع آنچه که منظور است و به وسیله آزمایش اندازه گیری می شود، انرژی آزاد سطحی (γ) است. انرژی آزاد یک سیستم دارای سطح مشترک A و انرژی آزاد γ بر واحد سطح ،عبارت است از:

$$G = G_0 + A\gamma \qquad (۳-۱)$$

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

کـه در این رابطه G_0 انرژی آزاد سیستم است با فرض اینکه تمام ماده موجود در سیستم خاصیت توده درون آن را داشته باشد. بنابراین γ ***انرژی آزاد اضافی***[1] ناشی از مـواد روی سطوح و یا نزدیک سطوح است. همچنین این کمیّت ، مقدار کاری است که در T و P ثابت لازم است تا یک واحد از سطوح مشترک را ایجاد کند.

برای درک آسان (بهتر) موضوع، یک چهار چوب سیمی مانند شکل ۱-۳ و یک لایه نازک مایع کشیده شده روی آن را در نظر بگیرید. یک ضلع این چهارچوب قابل حرکت است. براساس تجربه به دست آمده، نیرویی مانند F بر واحد طول باید به این ضلع وارد شود تا آن را در موقعیت خود نگه دارد. اگر این نیرو فاصله کوتاهی را بپیماید، به گونه ای که سطح لایه نازک مایع به اندازه dA افزایش یابد، کار انجام شده به وسیله این نیرو عبارت از F.dA است. این کار انرژی آزاد سیستم را به اندازه dG افزایش می‌دهد و با توجه به رابطه ۱-۳ خواهیم داشت :

$$dG = \gamma dA + A d\gamma$$

به جای dG، مقدار آن F.dA را قرار می دهیم.

$$F = \gamma + A\frac{d\gamma}{dA} \qquad (۳-۲)$$

1. Excess free energy

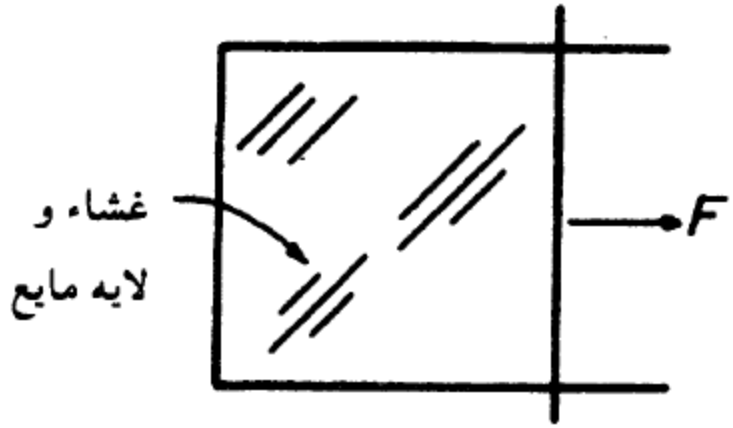
www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

درمـورد لایه ای نازک از مـایع انرژی سطحی به آرایش یا نوع سطح بسـتگی ندارد. با این فـرض نتیجه گیری می شود.

$$\frac{d\gamma}{dA} = 0$$

و در نتیجه رابطه مشهور زیر به دست می‌آید:

$$F = \gamma \qquad (۳-۳)$$



شکل ۱-۳ غشای مایع روی چهار چوب سیمی

یعنی آنکه یک سطح با انرژیٔ آزاد γ ژول بر متر مربع کشش سطحی برابر γ نیوتن بر متر ایجاد می کند.

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

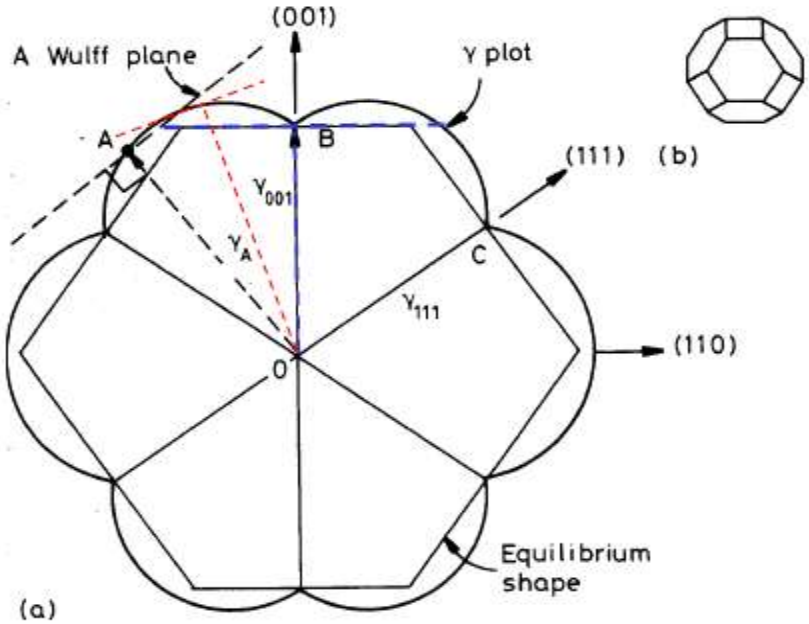
در مورد سطوح مربوط به جامدات ، این امر به روشنی آشکار نیست که γ به نوع و آرایش سطح وابسته است. از آنجا که مایع قادر به تحمل تنش برشی نیست، اتم های درون مایع در فرآیند کشش می تواند نظم جدیدی به خود بگیرد، به طوری که ساختار سطحی ثابتی داشته باشد. جامدات چسبنده تر از مایعات است وا نتقال یک اتم از توده و حجم درون آن به سطح بسیاربیشتر از مایع به طول می انجامد که برای ثابت نگه داشتن ساختار سطح لازم است. اگر این زمان نسبت به زمان آزمایش طولانی باشد در این صورت $\frac{d\gamma}{dA} \neq 0$ و انرژی سطحی و کشش سطحی یکسان نخواهد بود. با این وجود در درجه حرارت های نزدیک به ذوب تحرک اتمی معمولاً بالاست و رابطه (۳-۳) صادق خواهد بود.

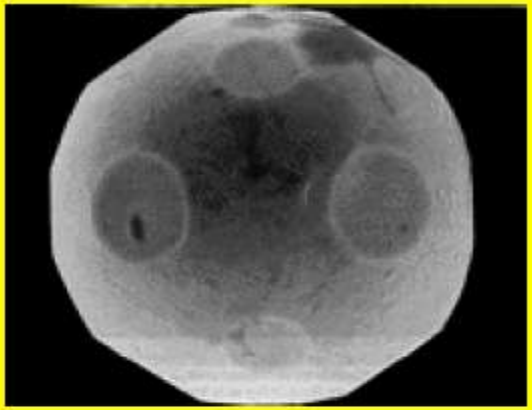
۳-۲ سطح مشترک بین جامد و بخار

با تقریب اولیه می توان ساختار سطح جامد را با مدل کره های سخت بیان کرد. اگر سطحی به موازات صفحه ای بلوری با اندیس میلر با اعداد کوچک باشد نظم و ترتیب اتمی مانند درون بلور خواهد بود بجز اینکه شاید تغییر جزیی در اندازه پارامتر شبکه ایجاد شود.(فرض بر این است که سطح

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

equilibrium crystal shapes





Au at ~1000°C after Heyraud and Métois, J. Cryst. Growth ***50****, 571 (1980)*

The Wulff construction of the equilibrium shape is obtained by drawing a plane through each point on the γ-plot perpendicular to the line connecting that point to the origin. The body formed by all points reachable from the origin without crossing any of these planes is geometrically similar to the equilibrium shape.

Equilibrium: crystal shape determined by minimizing energy, E.
For constant P, T, V and molar mass:

$$\sum_{i=1}^{N} A_i \gamma_i = \min . \qquad (75)$$

$$\sum_{i=1}^{N} A_i \gamma_i = A_1\gamma_1 + A_2\gamma_2 + A_3\gamma_3 + \ldots \qquad (76)$$

$$dE = 0 = \sum_{i=1}^{N} \gamma_i dA \qquad (77)$$

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

۳-۳ مرزها در جامدهای تک فاز

دانه های یک فار ***چند بلوری***[۲] می تواند جهات بی شماری را به خود بگیرد و بنابراین انواع مرزهای مختلف را ایجاد کند. طبیعت هر نوع مرزی به اختلاف جهت های بلوری دانه های مجاور یکدیگر بستگی دارد. شبکه های فضایی هر دو دانه مجاور می تواند با گردش زاویه مناسب نسبت به یک تک محور روی هم قرار گیرد. وضعیت محور چرخش مورد نظر نسبت به هر یک از دو دانه و یا صفحه مرز دانه ، به آسانی مشخص نمی شود، ولی در دو حالت خاص این کار نسبتاً ساده است. این دو حالت عبارت از ***مرز کج خالص***[۳] و ***مرز پیچشی خالص***[۴] است که در شکل ۶-۳ نشان داده شده است. یک

مرزکج زمانی به وجود می‌آید که محور دوران به موازات صفحه مرزی باشد (شکل ۶-۳،الف)، در حالی که در یک مرز پیچشی محور دوران دو دانه نسبت به هم عمود بر صفحه‌ی مرزی است (شکل ۶-۳، ب).

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

Low angle grain boundaries *(misorientation < 10º)*

Two extremes

TILT

An array of edge dislocations

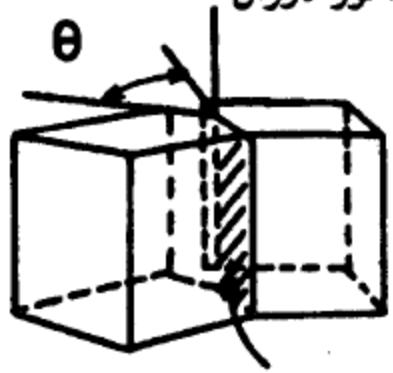
- Rotation axis lies on the boundary plane

TWIST

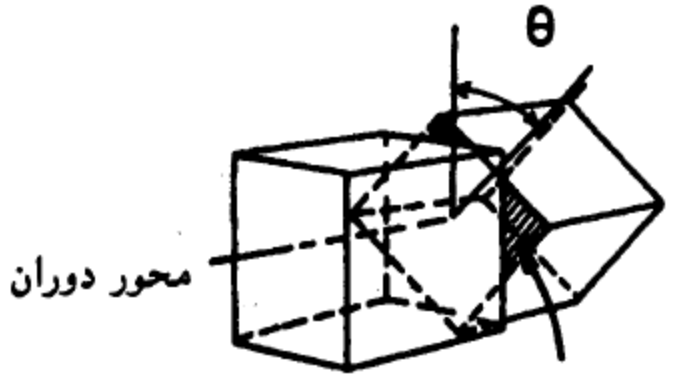
An array of screw dislocations

- Rotation axis lies ⊥ to the boundary plane

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد



صفحه مرزی (الف)



صفحه مرزی

(ب)

شکل ۶-۳: جهات نسبی بلورها و مرزهایی که تشکیل می‌دهد الف) مرزکجی ب) مرز پیچشی

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

۱-۳-۳ مرزهایی با زاویه کوچك و زاویه بزرگ

نخست ساده تر است حالت ناهمخوانی اندک جهات بین دو دانه را بررسی کنیم. می توان به آسانی این نوع مرز را ردیفی از نابجایی ها در نظر گرفت. دو نوع مرز ایده‌آل از این نوع در شکل ۷-۳ توضیح داده شده است. این لایه ها عبارت از مرز کج باز زاویه کوچک متقارن و مرز پیچشی با زاویه کوچک متقارن است. مرز کج با زاویه کوچک ، ردیفی از نابجایی های پله ای موازی است، در حالی که مرز پیچشی ناشی از تقاطع دو مجموعه نابجایی پیچشی است.در هر دو مورد بالا اتم های واقع در مناطق بین نابجایی ها دقیقاً در شبکه ی بلوری هر دو دانه مجاور جفت است، در حالی که هسته نابجایی ها، مناطق همخوان ضعیفی است که ساختار بلور در آنجا دچار پیچش شدید شده است.

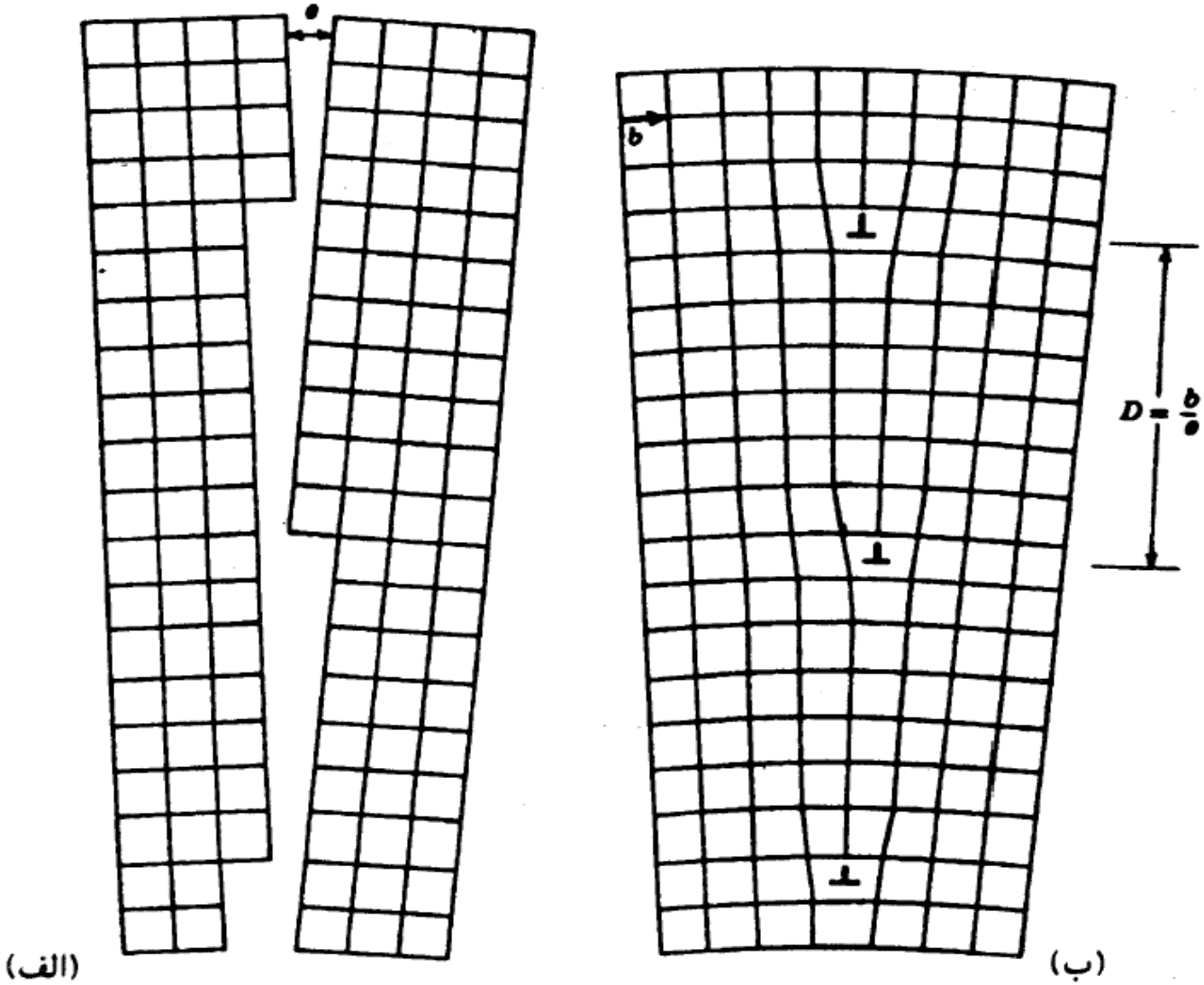
مرز کج لازم نیست که نسبت به دو دانه مجاور متقارن باشد، ولی چنانچه مرز نامتقارن باشد، نابجایی هایی با *بُردار برگر*[1] متفاوت بایسته است تا ناهمخوانی اتمی را جبران کند (شکل ۸-۳). به طور کلی مرزها می تواند آمیخته ای از مرزهای کج و پیچشی باشد، یعنی آنکه یک مرز باید مجموعه های متفاوتی از نابجایی های پیچشی و پله ای باشد.

---

*. (W.T. E ead Jr, dislocation in Crystals , McGraw Hill , New York, 1953)

1. Burger's vector

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد



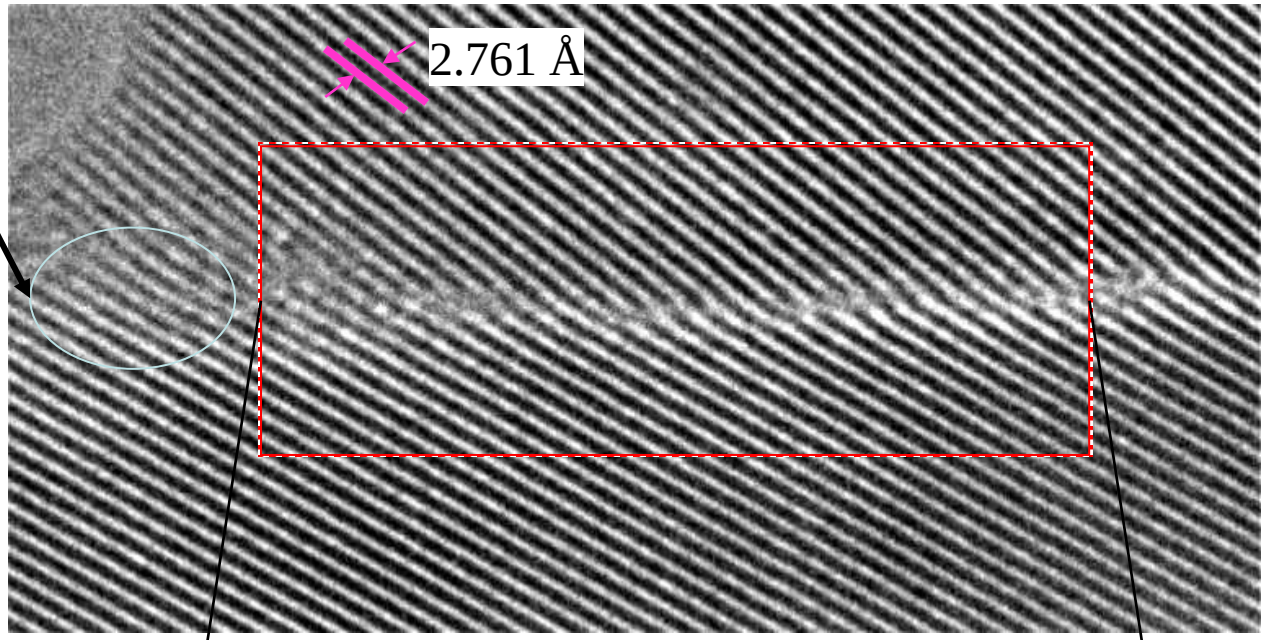
شکل ۷-۳ الف) مرز کج با زاویه کم ب) مرز پیچشی با زاویه کم :

O اتم های درون بلور زیر مرز • اتم های درون بلور بالای مرز*

www.iran-mavad.com

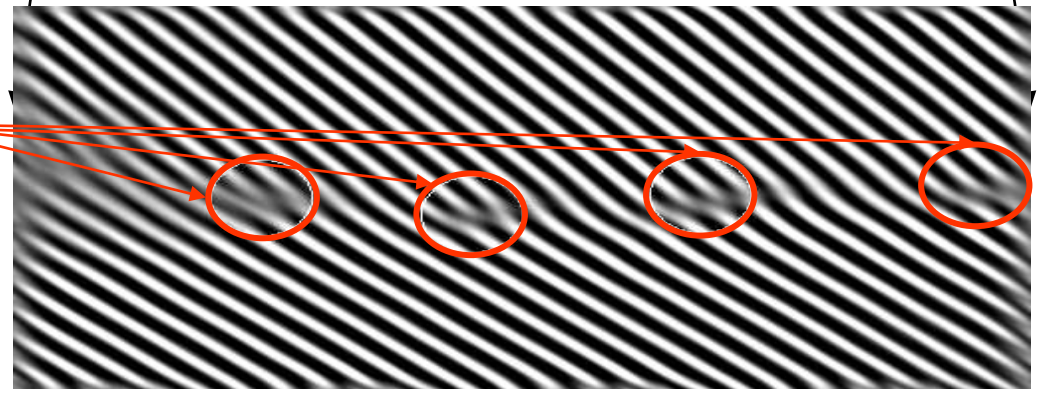
~8º TILT BOUNDARY IN $SrTiO_3$ POLYCRYSTAL

مرجع دانشجویان و مهندسین مواد



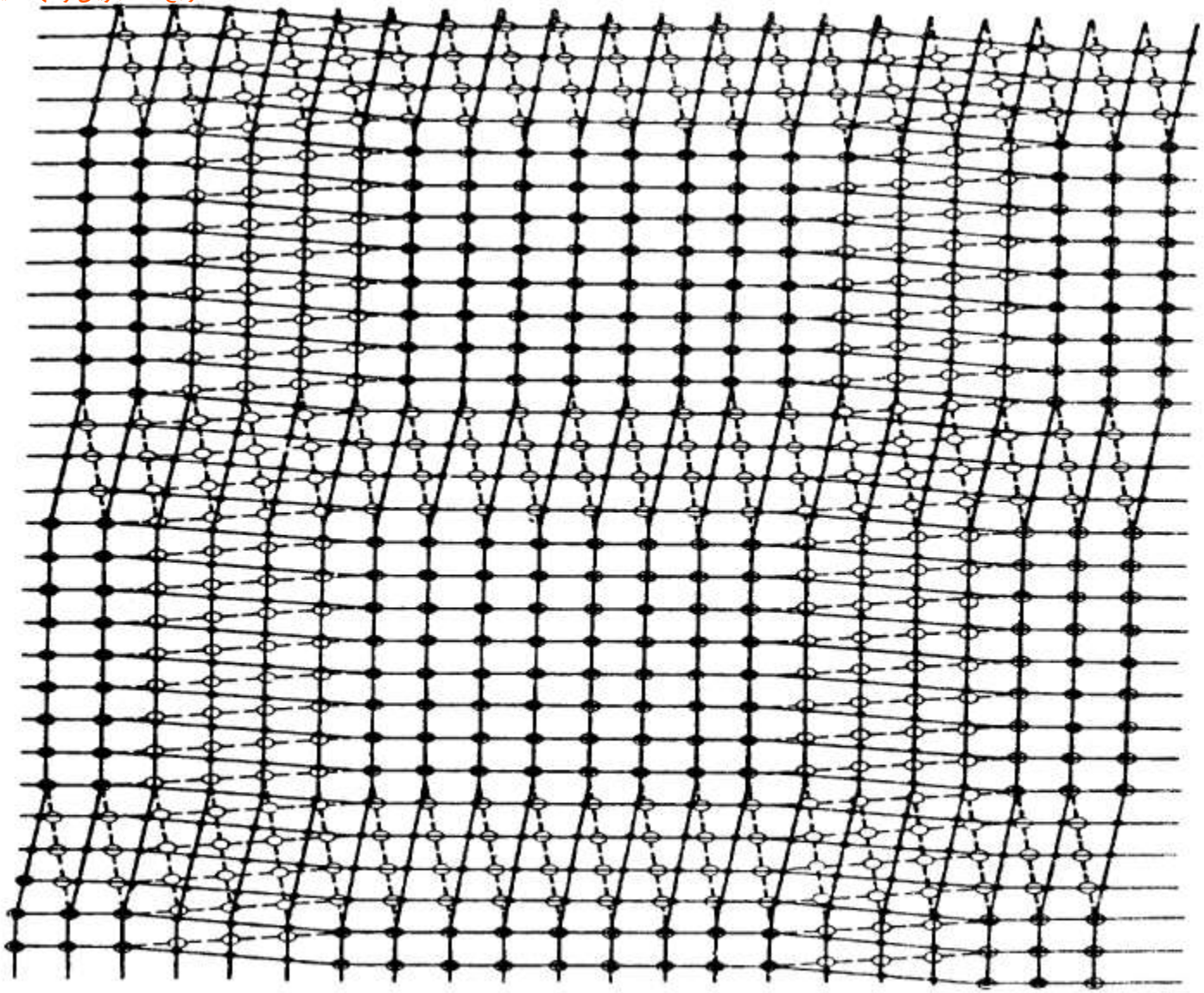
No visible Grain Boundary

Fourier filtered image



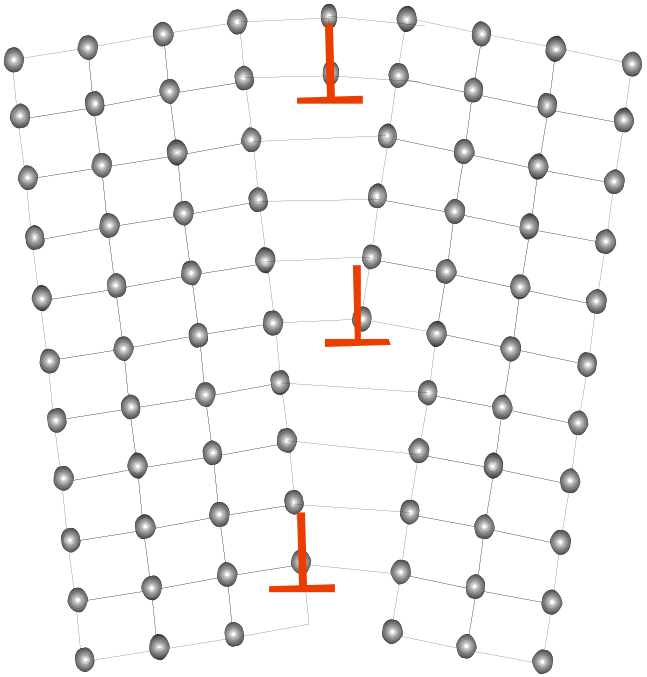
Dislocation structures at the Grain boundary

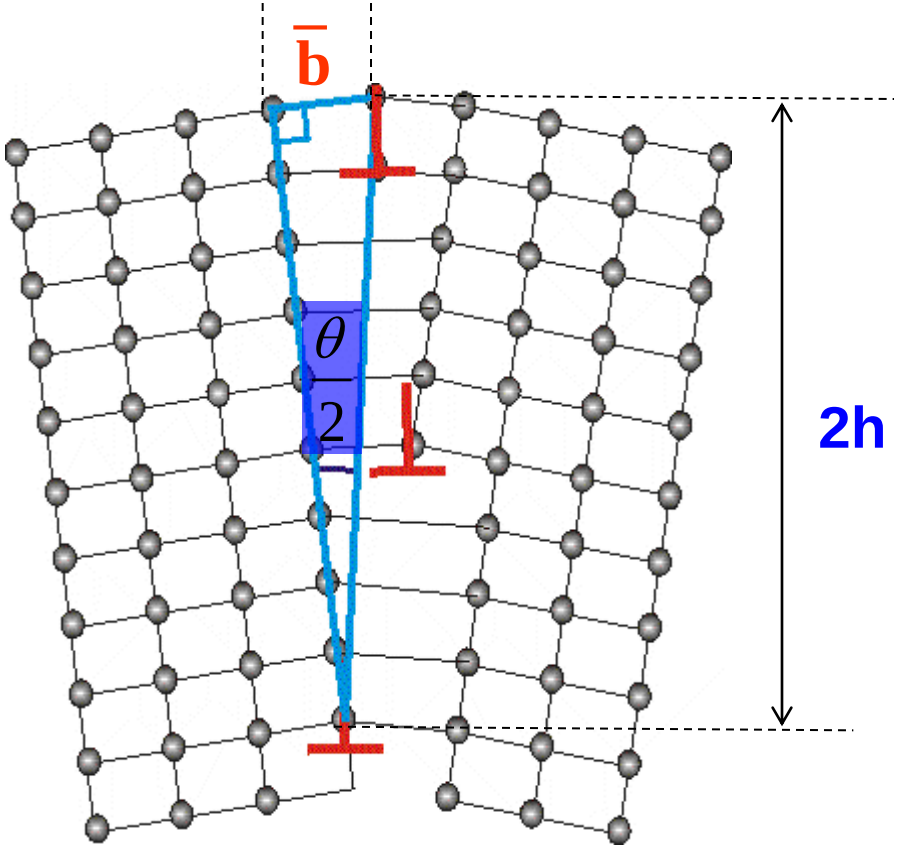
www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد



شکل ۷-۳: (ب)

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد





$$\frac{b}{2h} = Sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

$$\frac{b}{h} \sim \theta$$

$$\frac{b}{h} = \tan\theta$$

Book

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

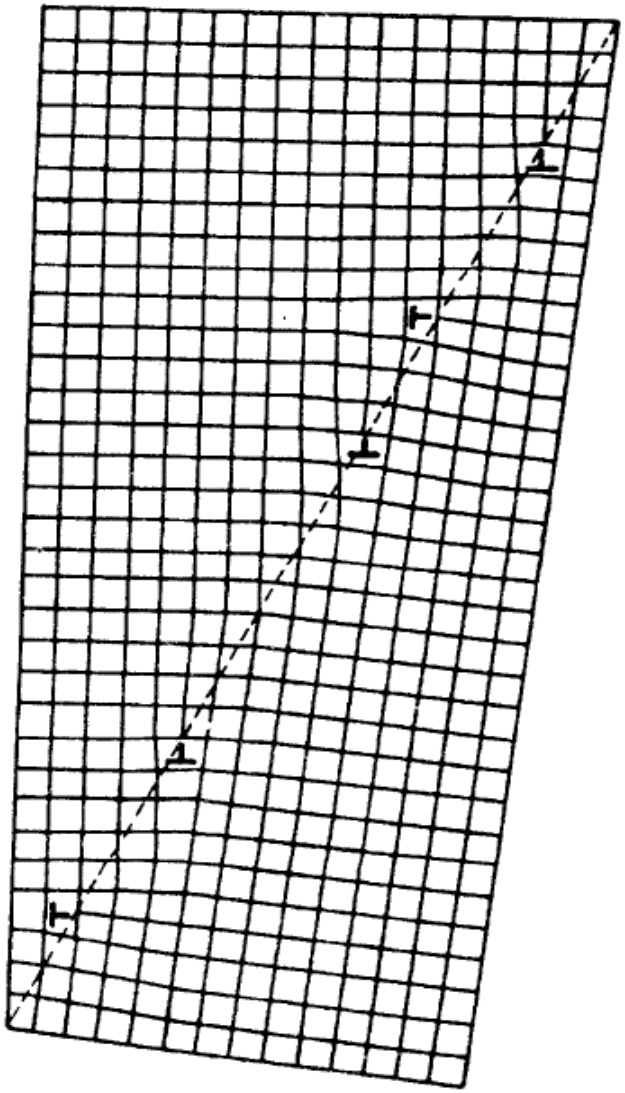
انرژی مرز دانه ای با زاویه کوچک برابر مجموع انرژی نا بجایی های موجود واحد سطح در مرز است. (برای رعایت اختصار از این پس اختلافی بین انرژی درونی و انرژی آزاد قائل نمی شویم، مگر آنکه برای درک بهتر بایسته باشد.) این انرژی به فاصله و فضای میانگین نابجایی ها بستگی دارد. برای مثال، ردیف ساده شکل ۷-۳، الف را در نظر بگیرید که با رابطه زیر داده شده است :

$$D = \frac{b}{\sin\theta} \simeq \frac{b}{\theta} \qquad (۳-۹)$$

که در رابطه بالا b بُردار بِرگر نابجایی ها و θ زاویه ناهمخوانی در طول مرز است . در θ های بسیار کوچک فاصله بین نابجایی‌ها بسیار بزرگ است و انرژی مرزی (γ) تقریباً متناسب با دانسیته نا بجایی‌ها در مرز است ($\frac{۱}{D}$) ، یعنی

$$\gamma \propto \theta \qquad (۳-۱۰)$$

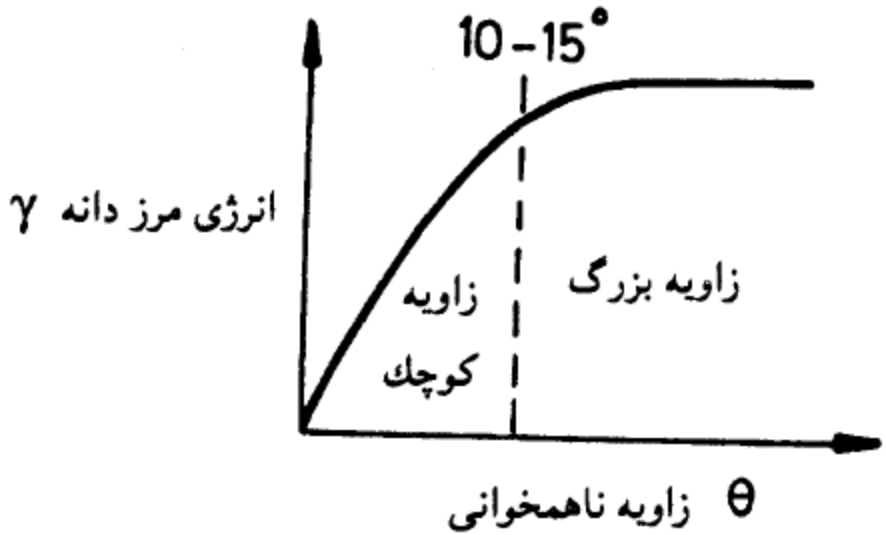
www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد



شکل ۸-۳ : یك مرز کج نامتقارن که نابجایی‌ها با دو نوع بُردار برگر مختلف حضور دارد*

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

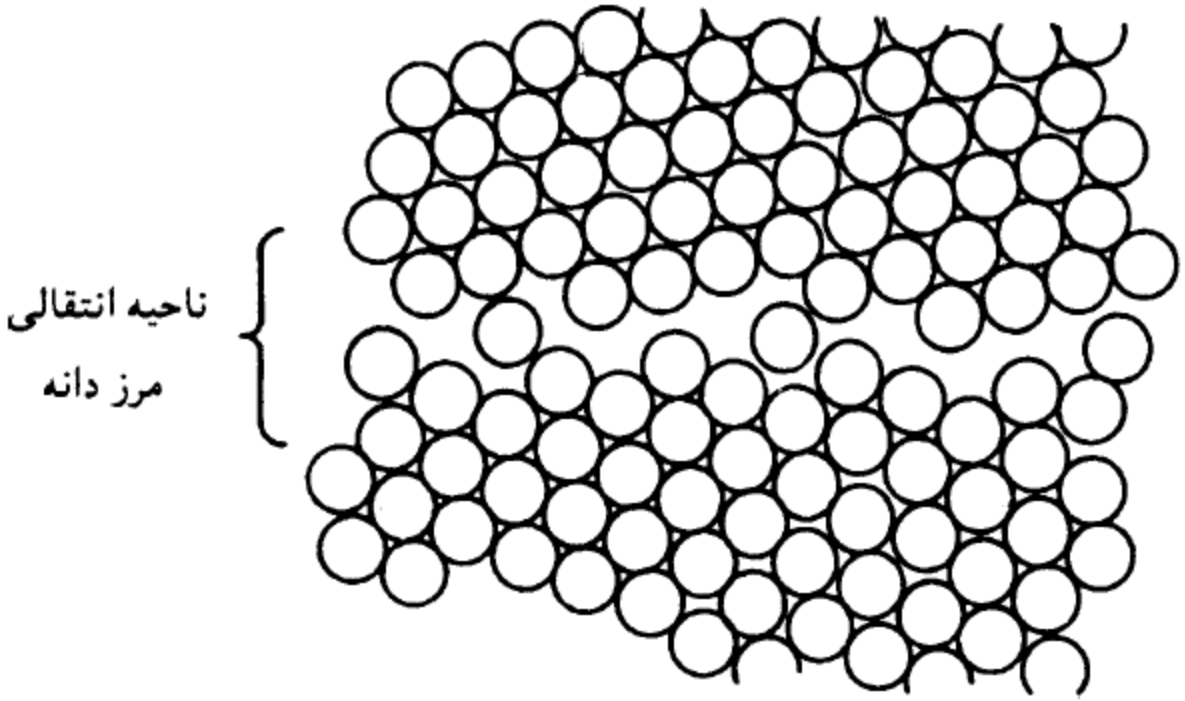
اما با افزایش زاویه θ چون میدان کرنشی نابجایی ها به تدریج همدیگر را خنثی می کند و γ نسبت به θ با نرخ کاهنده ای افزایش می یابد، به گونه ای که در شکل ۹-۳ نشان داده شده است. عموماً هنگامی که θ از ۱۰ تا ۱۵ درجه بیشتر شود، فواصل نابجایی ها به اندازه ای کوچک می شود که هسته آنها روی هم قرار گرفته و تشخیص این نابجایی ها از همدیگر به طور فیزیکی میسّر نیست (شکل ۱۰-۳ را ببینید). در این مرحله ، انرژی مرز دانه تقریباً از ناهمخوانی جهات مستقل می شود (شکل ۹-۳).



شکل ۹-۳ : تغییرات انرژی آزاد مرز دانه نسبت به θ

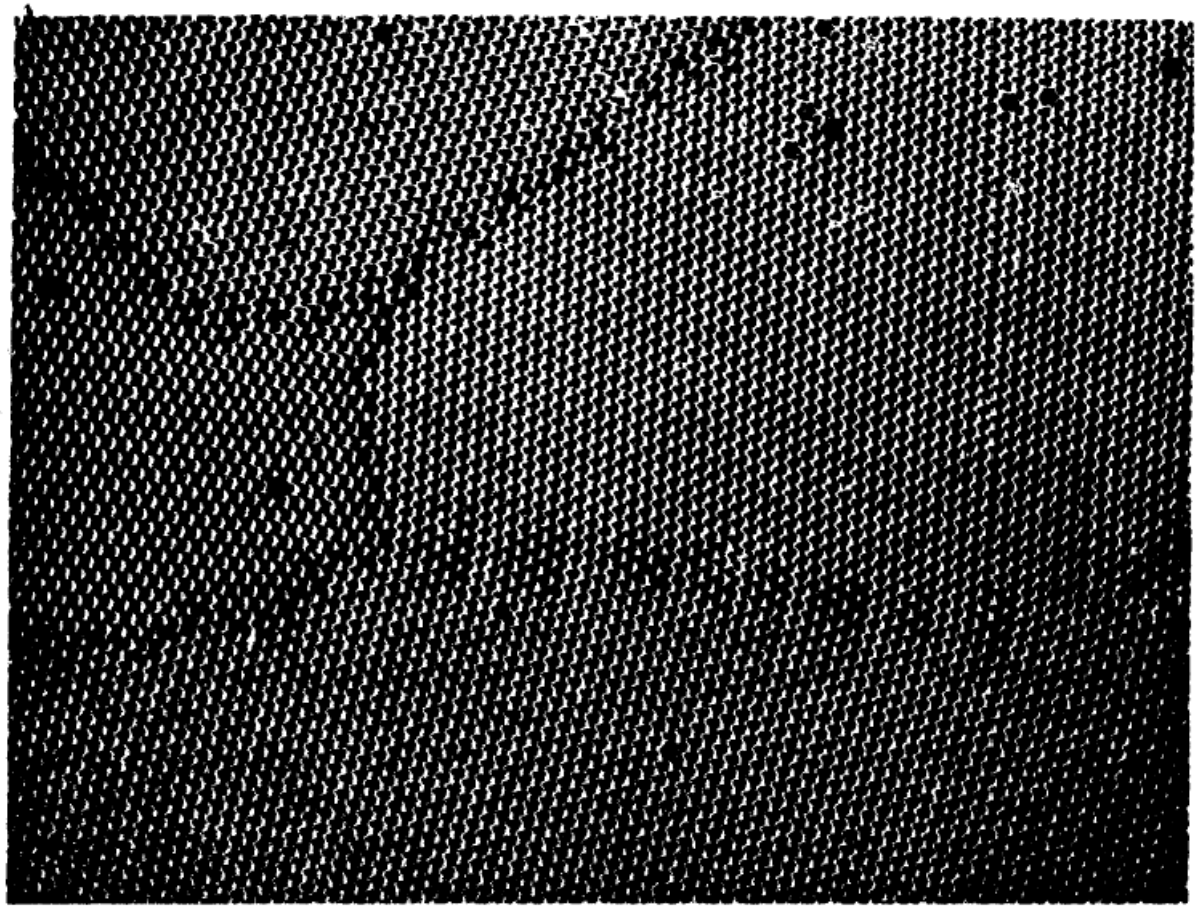
www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

هنگامی که θ بزرگ تر از ۱۵-۱۰ درجه باشد، مرز به نام مرز دانه با زاویه بزرگ تصادفی خوانده می شود. شاید بتوان تفاوت بین ساختار مرزهای با زاویه کوچک و با زاویه بزرگ را به وسیله مدل حباب های کف صابون شناور نشان داد (شکل ۱۱-۳).



شکل ۱۰-۳: ساختار بی نظم مرز دانه ها

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد



شکل ۱۱-۳: دسته حباب‌های صابون شناور که چندین دانه با میزان انحراف متفاوت از یکدیگر را نشان می‌دهد. توجه داشته باشید که مرزهایی با کمترین انحراف از ردیف هایی از نابجایی تشکیل شده است، در حالی که مرزهایی با زاویه بزرگ ساختاری نامنظم دارد که در آنها نابجایی های منفرد قابل تشخیص نیست.*

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

مرزهایی با زاویه بزرگ، مناطق نسبتاً بزرگی از همخوانی ضعیف و ساختار نسبتاً باز را در برمی گیرد. پیوند اتم ها شکسته یا به شدت پیچیده و تغییر شکل داده است، و در نتیجه مرزها انرژی نسبتاً بالایی دارد. در مرزهای با زاویه کوچک تقریباً بیشتر اتم های مرزی در هر دو شبکه دانه های مجاور همخوان است، بنابراین حجم آزاد اندکی وجود دارد و پیچیدگی پیوندهای اتمی کم است. نواحی همخوان ضعیف منحصر به هسته نابجایی ها است که همانند مرزهایی با زاویه بزرگ نسبت به دیگر ناحیه ها از انرژی بالاتری برخوردار است.

انرژی مرزهای با زاویه بزرگ (γ_b) را می توان با تخمین زیر به دست آورد.

$$\gamma_b \simeq \frac{1}{3}\ \gamma_{sv} \qquad (۳-۱۱)$$

مقادیر γ_b و γ_b / γ_{sv} برای برخی از فلزات در جدول ۲-۳ ارائه شده است. همانند انرژی سطحی، γ_b نیز کمیّتی وابسته به درجه حرارت است و با افزایش درجه حرارت مقدار آن کاهش می یابد.

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

جدول ۲-۳

انرژی آزاد مرز دانه ها که به روش آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده است *

بلور	γ_b / mJ m^{-2}	T/°C	γ_b / γ_{sv}
Sn	۱۶۴	۲۲۳	۰/۲۴
AL	۳۲۴	۴۵۰	۰/۳۰
Ag	۳۷۵	۹۵۰	۰/۳۳
Au	۳۷۸	۱۰۰۰	۰/۲۷
cu	۶۲۵	۹۲۵	۰/۳۶
γ-Fe	۷۵۶	۱۳۵۰	۰/۴۰
δ-Fe	۴۶۸	۱۴۵۰	۰/۲۳
Pt	۶۶۰	۱۳۰۰	۰/۲۹
W	۱۰۸۰	۲۰۰۰	۰/۴۱

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

۲-۳-۳ مرزهایی با زاویه بزرگ ویژه

تمامی مرزهای با زاویه بزرگ دارای ساختار نامنظم باز نیست. انواعی از مرزهای با زاویه بزرگ ویژه وجود دارد که دارای انرژی بسیار کمتری نسبت به مرزهای با زاویه بزرگ تصادفی است. این مرزها فقط به صورت ناهمخوان در جهت ها و صفحه های مرزی خاصی به وجود می آید، به‌گونه ای که دو شبکه مجاور یکدیگرمی تواند با کمترین مقدار پیچش در پیوندهای اتمی با هم جفت شود.

ساده ترین مرزها با زاویه بزرگ ویژه مرز بین دوقلوهاست. اگر مرز دو قلو موازی صفحه دو قلو باشد، اتم های مرزی کاملاً در شبکه هر دو دانه همخوان است. نتیجه این امر یک مرز ***دوقلوی همبسته***[1] است همانند آنچه در شکل ۱۲-۳، الف نشان داده شده است. در فلزات fcc صفحه ی متراکم {۱۱۱} یکی از این صفحه های ویژه است. زیرا اتم ها در چنین مرزی در موقعیت تغییر شکل نیافته ای قرار دارد، انرژی یک مرزی دوقلوی همبسته به طور فوق العاده ای نسبت به یک مرز با زاویه تصادفی ، کوچک است.

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

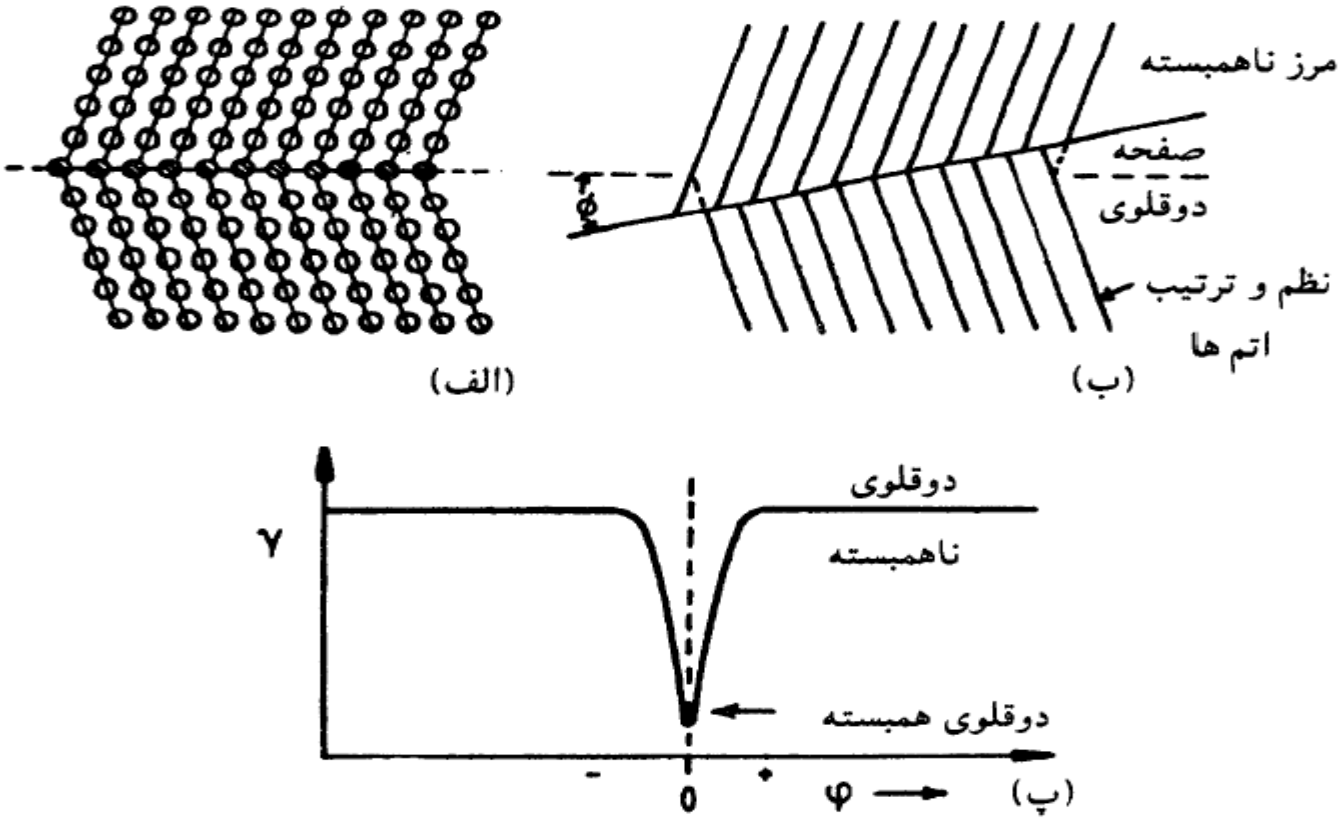
Twin Boundary

- The atomic arrangement on one side of the twin boundary is related to the other side by a symmetry operation (usually a mirror)
- Twin boundaries usually occur in pairs such that the orientation difference introduced by one is restored by the other
- The region between the regions is called the twinned region

Twin
- Annealing twins *(formed during recrystallization)*
- Deformation twins *(formed during plastic deformation)*

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

اگر مرز دو قلو کاملاً به موازات صفحه دو قلو نباشد (شکل ۱۲-۳،ب) ، اتم ها دقیقاً در شبکه فضایی هر دو دانه جفت نمی شود و انرژی مرزی بسیار بالاتر است. این نوع مرز را دوقلوهای ناهمبسته می نامند. بنابراین انرژی سطحی یک مرز دوقلو به جهت صفحه مرزی بسیار حساس است.



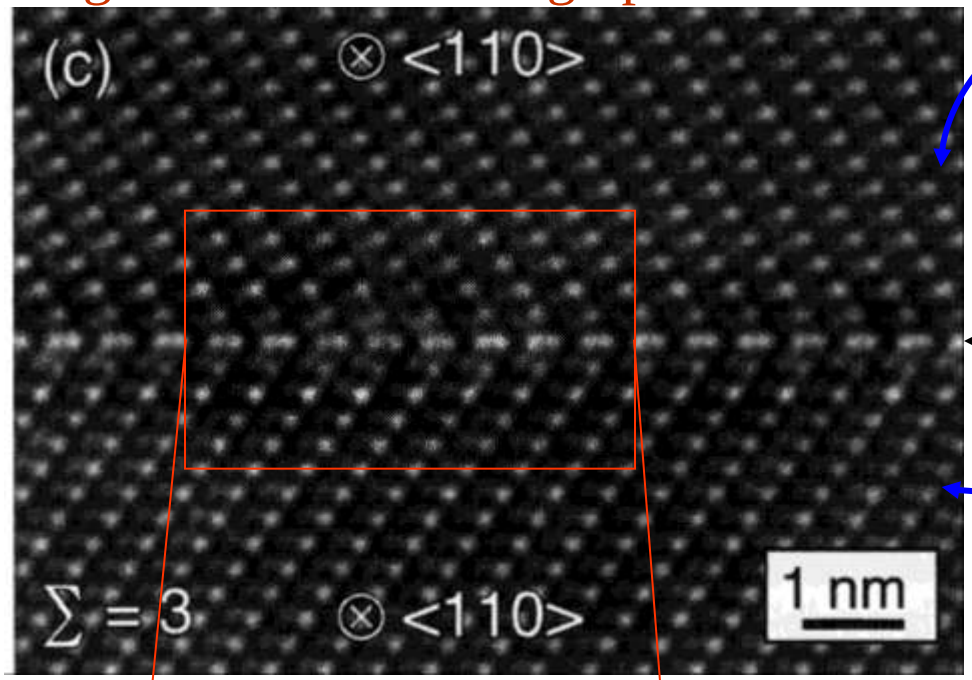
شکل ۱۲-۳ : الف) یك مرز دوقلوی همبسته ب) یك مرز ناهمبسته دوقلو پ) انرژی مرزی دوقلو به صورت تابعی از جهت مرز دانه ها

1. Coherent twin boundary

www.iran-mavad.com

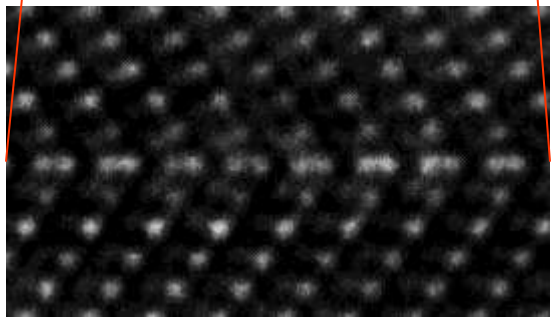
Twin boundary in Fe doped $SrTiO_3$ bicrystals *(artificially prepared)*

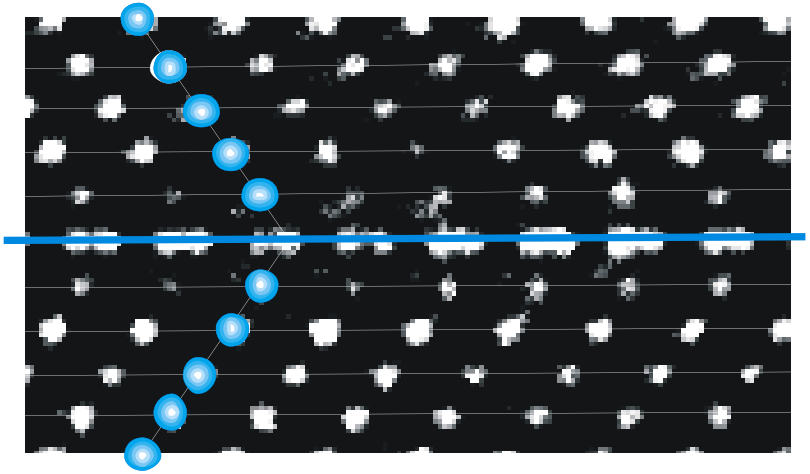
High-resolution micrograph



Mirror related variants

Twin plane





[1] S. Hutt, O. Kienzle, F. Ernst and M. Rühle, Z Metallkd, **92** (2001) 2

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

اگر γ را نسبت به جهت مرز رسم کنیم کمینه‌ای نیز مربوط به موقعیت مرز همبسته پدیدار می شود (شکل ۱۲-۳،پ) در جدول ۳-۳ نتایج آزمایشگاهی مربوط به اندازه گیری مرزهای دوقلوی همبسته و ناهمبسته و مقایسه آنها با مرزهای تصادفی ارائه شده است.

جدول ۳-۳

انرژی آزاد مرزهای دوقلو (mJ/m^2) *

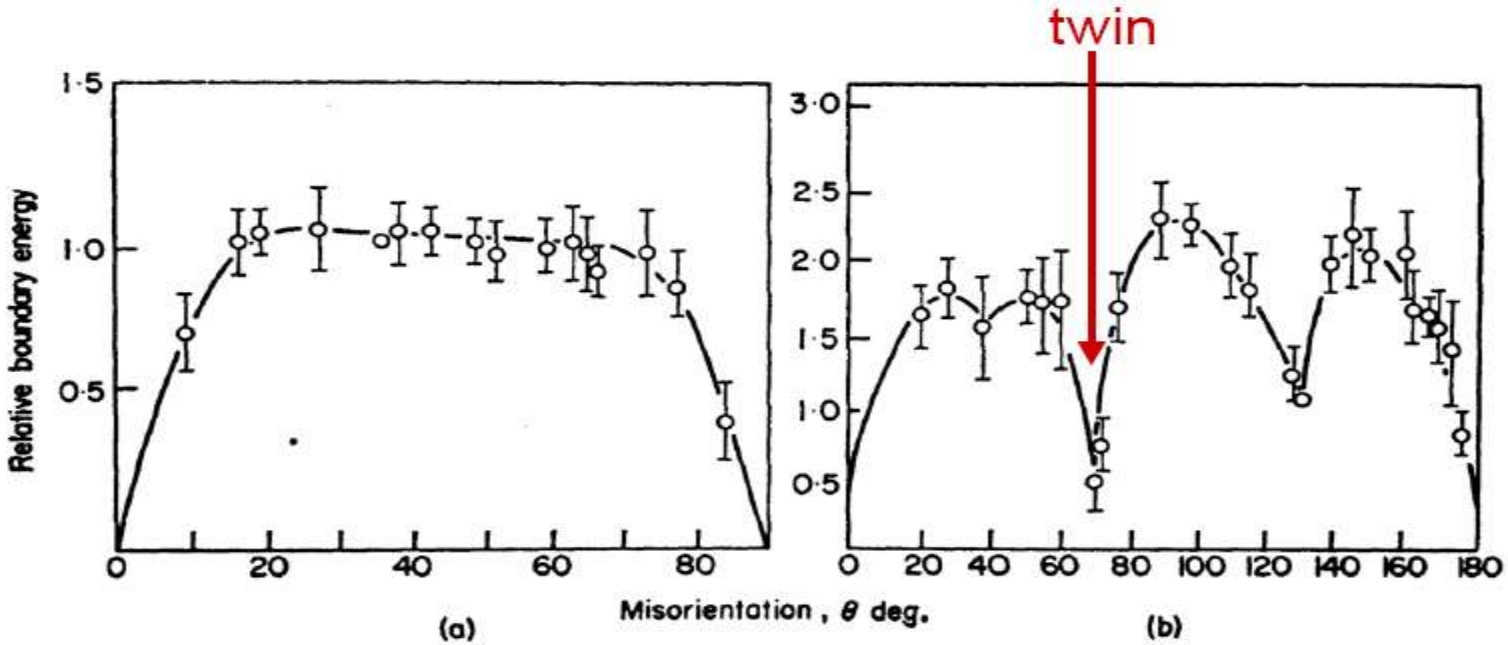
بلور	انرژی مرزی دوقلوی همبسته	انرژی مرز دوقلوی ناهمبسته	انرژی مرز دانه تصادفی
Cu	۲۱	۴۹۸	۶۲۳
Ag	۸	۱۲۶	۳۷۷
Fe-Cr-Ni فولاد ضد زنگ نوع ۳۰۴	۱۹	۲۰۹	۸۳۵

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

آرایش دوقلو در فلزات fcc مرتبط به ناهمسویی برابر ۷۰/۵ درجه پیرامون یک محور <۱۱۰> است. بنابراین مرز دوقلو، مرزی با زاویه بزرگ ویژه است و یک مرز دوقلوی همبسته مرزی متقارن کج بین دو بلور دوقلو است. شکل ۱۳-۳ انرژی اندازه گیری شده انواع مرزهای کج متقارن را در آلومینیم نشان می دهد. هنگامی که دو دانه با دوران پیرامون محور<۱۱۰> به هم مرتبط شود، چندین جهت با زاویه بزرگ وجود دارد که نسبت به مرزهای تصادفی انرژی بسیار کمتری دارد (شکل۱۳-۳،ب) برای مثال $\theta = ۷۰/۵$ مربوط به مرز دوقلوی همبسته ای است که پیش از این اشاره شد، ولی مرزهای کم انرژی دیگری در جهت های دیگر نیز وجود دارد. دلیل وجودی این مرزهای کم انرژی دیگر بخوبی شناخته نشده است. به هرحال می توان این فرض را بخردانه دانست که ساختار اتمی این مرزها شرایط همخوانی و جفت شدن مناسبی با شبکه بلورهای دو دانه دارد. یک مثال دو بُعدی دارد شکل ۱۴-۳ نشان داده شده است. این تصویری فرضی از یک مرز کج متقارن بین دو دانه با زاویه ناهمسویی $۳۸/۲^{\circ}$ است. اتم های مرزی به خوبی در هر دو دانه جفت شده و حجم آزاد اندکی باقی گذاشته است. از آن گذشته، مجموعه ای کوچک از اتم ها (کره های سایه دار) در فواصل منظم

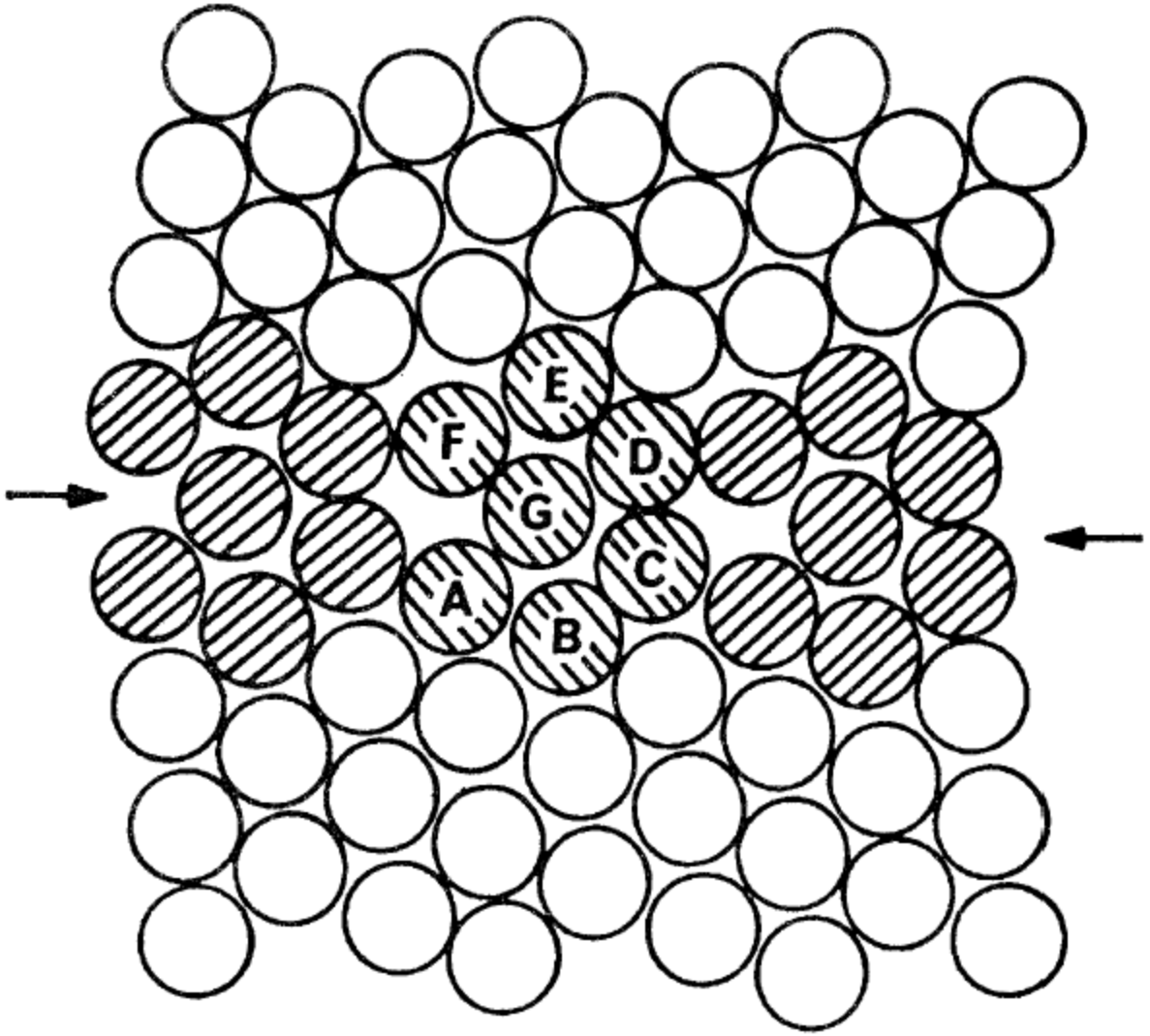
www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

در طول مرز تکرار شده است.



شکل ۱۳-۳: انرژی مرزی اندازه‌گیری شده برای مرز کجی متقارن در Al (الف) هنگامی که محور چرخش به موازات جهت های‹۱۰۰› است، ب) هنگامی که محور چرخش به موازات جهت های ‹۱۱۰› است*.

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد



شکل ۱۴-۳: مرز دانه‌های ویژه**

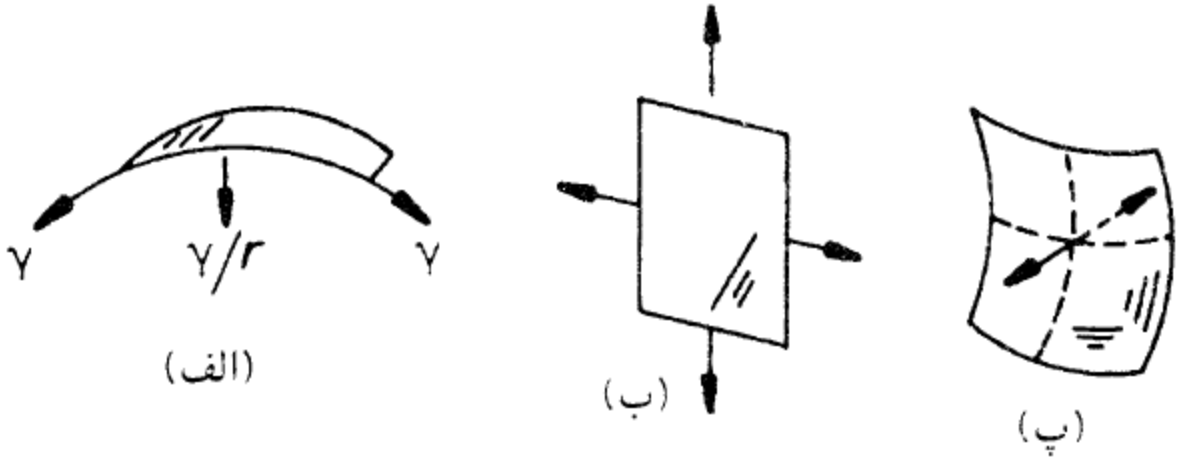
www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

۴-۳-۳ تحرک حرارتی[1] مرز دانه ها

در فصل پیش نشان داده شده که نیمه پایدار مانند در اتصال مرز دانه ها به شرایط حاکم لازم بر زوایای به وجود آمده در برخورد مرزها نیاز دارد . برای سادگی فرض کنیم که تمام مرز دانه های موجود در یک چند بلور مستقل از آرایش اتم ها در مرز دانه دارای انرژی برابر باشد، بنابر رابطه ۳-۱۳ باید $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 120^\circ$ همچنین می توان نشان داد که زوایای فضایی گوشه های مرزها باید برابر ۱۰۹/۲۸ درجه باشد که از برخورد چهار دانه در فضا تشکیل می شود . اگر این شرایط یا شرایط زاویه ای همانند یاد شده برقرار باشد، بنابراین تعادل نیمه پایداری در تمام محل های تلاقی مرز دانه ها برقرار می شود. به هرحال برای اینکه یک دانه بندی در تعادل نیمه پایدار کاملی قرار گیرد تمام کشش های سطحی در اتصال ها باید متوازن و در تعادل باشد . اگر یک مرز دارای انحنایی مانند سطح یک استوانه باشد (شکل ۲۰-۳، الف) نیرویی به اندازه γ/r که جهت آن به سوی مرکز انحنا است، روی آن و رد می شود. بنابراین تنها راه هماهنگ کردن نیروهای سطحی مرزها این است که تمام مرزها مسطح ($r = \infty$) شود و یا انحنایی دو جانبه با شعاع های برابر و عکس همدیگر داشته باشد (شکل ۲۰-۳ ب و پ).

1. Thermally activatied migration

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد



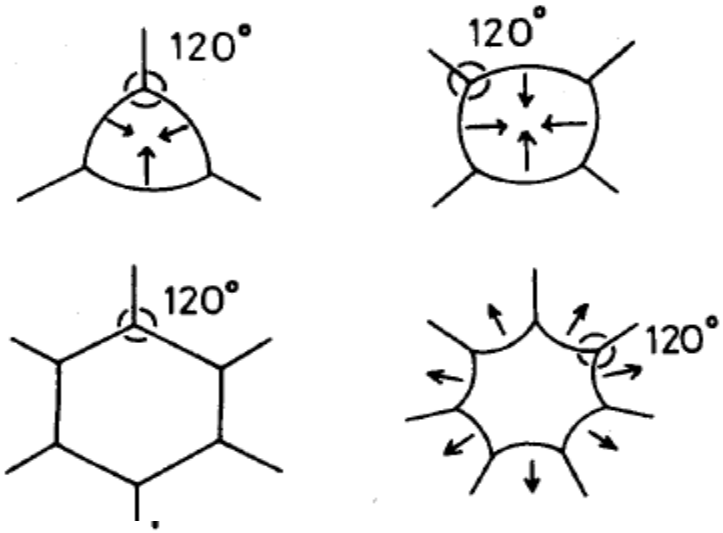
شکل ۲۰-۳: الف) یك مرز استوانه‌ای با شعاع انحنا r از نیروی γ/r متأثر است. ب) یك مرز مسطح بدون نیروی برایند پ) یك مرز با انحنای مضاعف بدون نیروی برایند

به طور نظری امکان پذیر است که یک بلور سه بُعدی را بنا کرد که در آن نیروهای کششی در تمام وجوه و اتصال ها در تعادل باشد. ولی در یک مجموعه چند بلور تصادفی مانند نمونه های متالوژیکی واقعی همواره مرزهایی وجود دارد که دارای انحنایی با برایند غیر صفر در یک جهت هست. در نتیجه مرزهای تصادفی ذاتاً ناپایدار است و در فرآیند تاباندن در درجه حرارت های بالا، نیروهای خنثی نشده حرکت مرزها به سوی مرکز انحنا را سبب می شود.

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

اثر انحنا های مختلف در دو بُعد در شکل ۲۱-۳ نمایش داده شده است. دوباره برای ساده تر شدن موضوع فرض شده ست که تعادل در اتصال های مرزها در زاویه ۱۲۰ به وجود می‌آید. بنابراین **اگر یک مرز دارای شش وجه باشد، برای آنکه ساختاری نیمه پایدار داشته باشد، همگی باید مسطح باشد به هرحال اگر تعداد وجوه در پیرامون یک دانه کمتر از ۶ بوده ، همگی باید دارای تقعر رو به درون باشد (شکل ۲۱-۳).**

grain growth: effect of grain boundary curvature



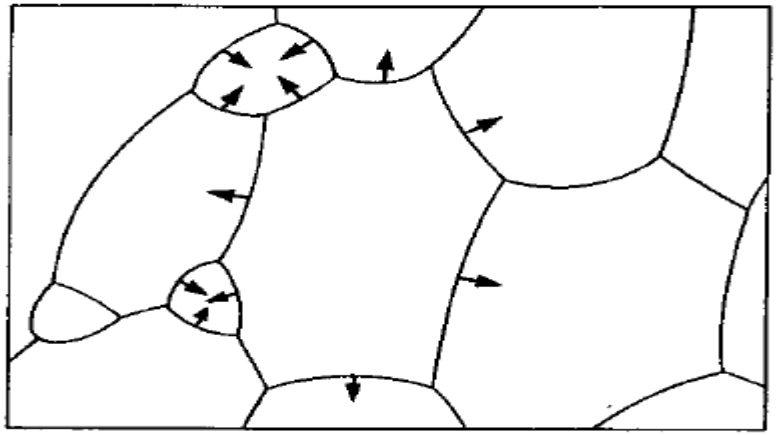
شکل ۲۱-۳: تصویر دو بُعدی مرز دانه ها. پیکان ها جهت مرز دانه ها. پیکان ها جهت مرزهایی را نشان می دهد که در طول رشد دانه ها حرکت می‌کند.

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

بنابراین مرزها منقبض و کوچک شده و سرانجام در فرآیند تابکاری ناپدید می شود. از سوی دیگر دانه های بزرگ تر بیش از شش مرز دارد و رشد خواهد کرد. نتیجه نهایی چنین جابه جایی های مرزها این است که مقدار و تعداد مرزها با بزرگ شدن اندازه متوسط دانه ها کاهش یابد و انرژی کلی مرزها کم می شود . این پدیده به نام ***رشد دانه***[1] موسوم است و در فلزات در درجه حرارتی بالای ۱/۲ درجه حرارت ذوب برحسب درجه کلوین رخ می دهد که میزان تحرک مرزها شایان توجه می شود. همانند سازی مناسب برای پدیده بالا رشد حباب های صابون است که در شکل ۲۲-۳ نشان داده شده است .

در مورد سلول های حباب های صابون، فشار بالاتر در جهت مقعر غشا ، هوای درون حباب های کوچک تر را به نفوذ از غشا به درون سلول های بزرگ تر وامی دارد و سرانجام حباب های کوچک تر

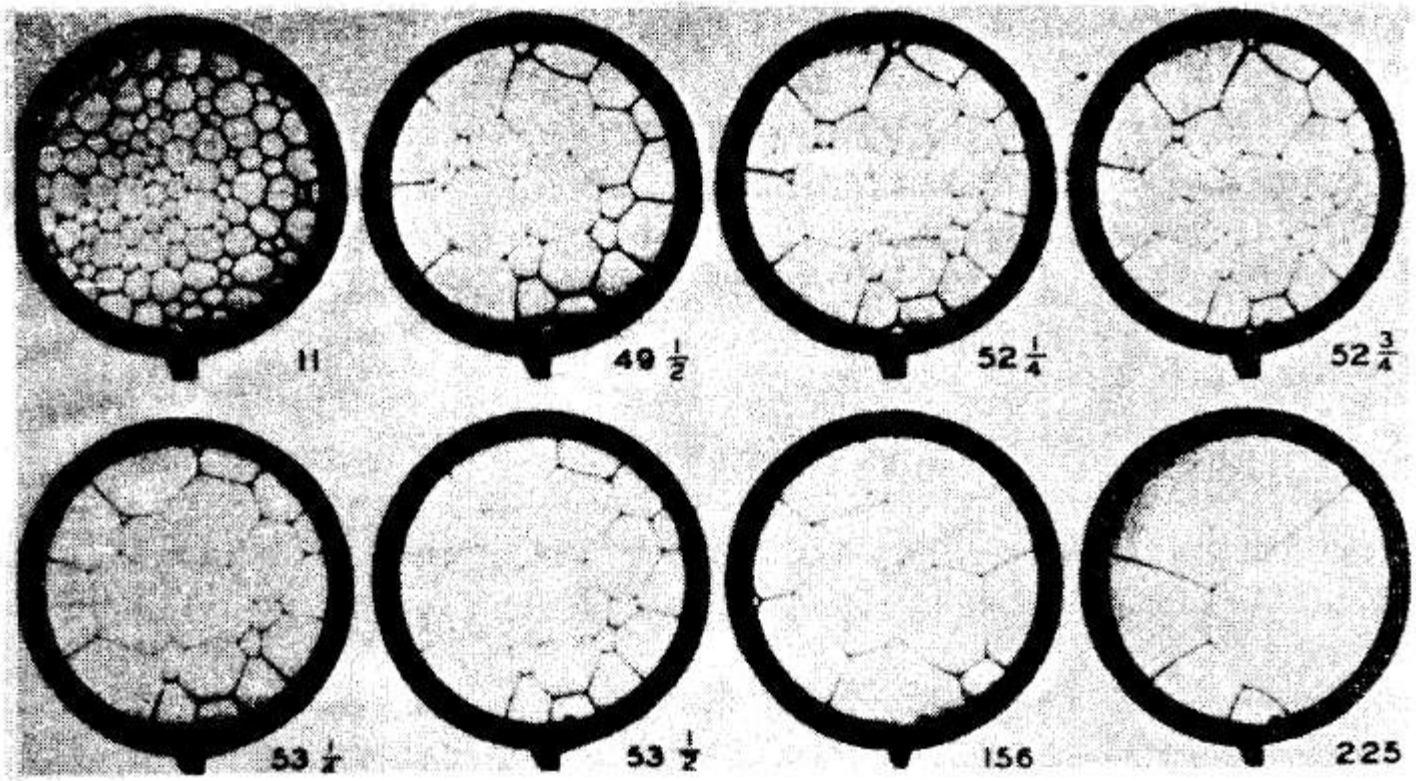
grain growth: competitive process



1. Grain growth

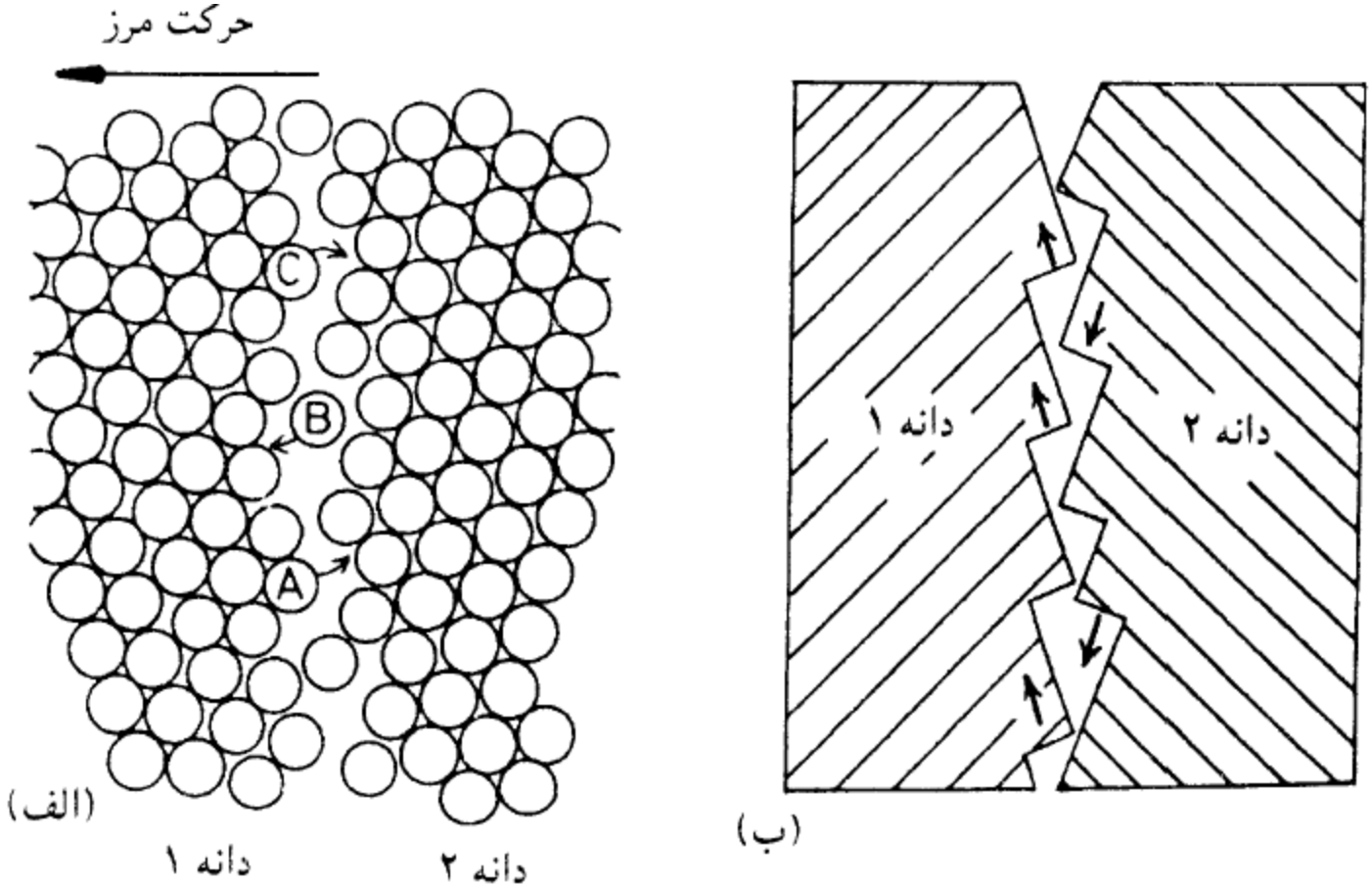
www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

ناپدید می شود . اثری همانند نیز در فلزات رخ می دهد. در این مورد اتم های موجود در دانه هایی که رو به کوچکی می رود خود را از شبکه دانه تحت فشار ازاد می کند و با گذر از مرز دانه و جایگزینی خود در شبکه دانه رشد یابنده قرار می گیرد.



شکل ۲۲-۳ : سلول های دو بعدی محلول صابون که فرآیند رشد دانه را نشان می دهد. اعداد زمان به دقیقه است *.

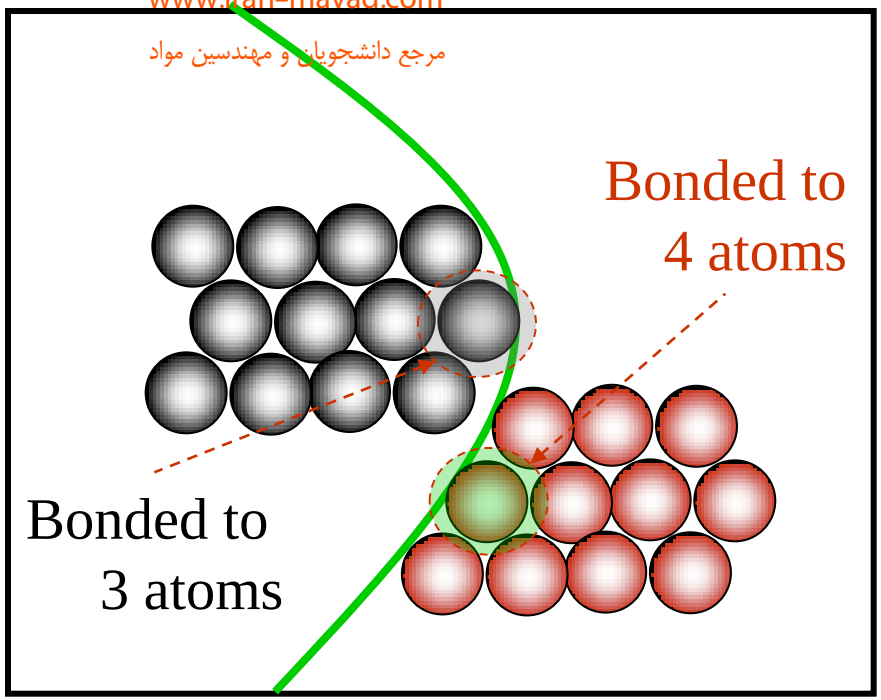
www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

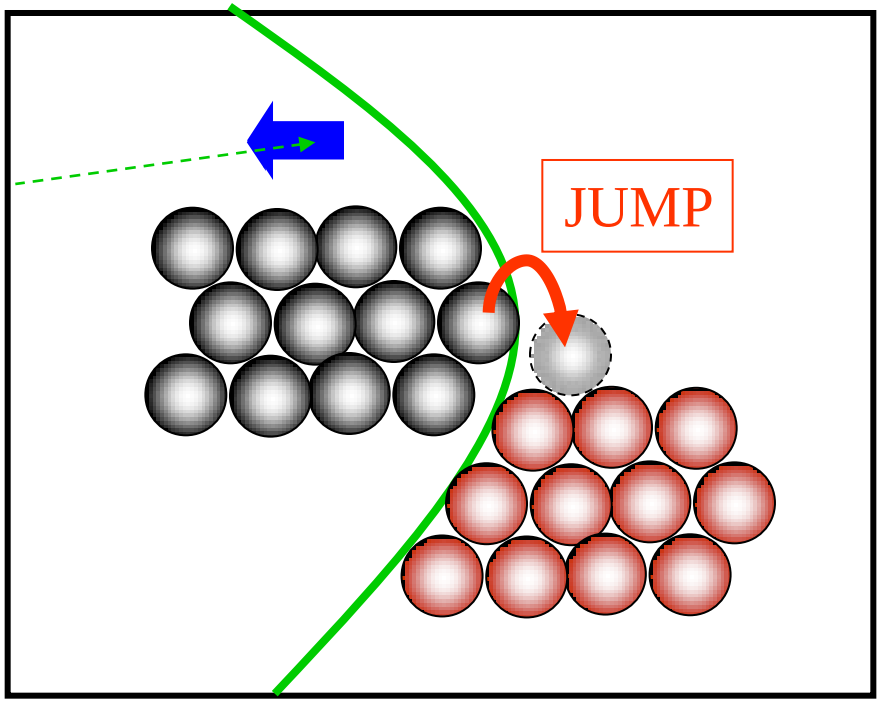


شکل ۲۳-۳: (الف) سازوکار اتمی حرکت مرزها . چنانچه سرعت پرش از دانه ۲←۱ بزرگ تر از ۱ ←۲ باشد مرز به سمت چپ حرکت می‌کند. توجه داشته باشید که در حجم آزاد درون مرز، برای روشنی بیشتر، اغراق شده است. (ب) ساختار پله‌ای که در آن صفحه‌های متراکم به درون مرز کشیده شده است.

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

AS





Boundary moves towards its
centre of curvature

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

۴-۳: سطوح مشترک بین فازی در جامدات

در بخش گذشته در باره ساختار و خواص مرزها، بین بلورهای یک فاز جامد گفتگو شد . در این بخش درباره مرزهای بین فازهای جامد گوناگون بحث خواهیم کرد. چنین مرزهایی هنگامی

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

به دست می‌آید که دو بلور در تماس با هم، ساختار بلوری متفاوت و یا ترکیب شیمیایی متفاوت داشته باشد.

مرزهای بین فازی در جامدات از نظر ساختار اتمی به سه گروه تقسیم می شود: **همبسته**[1] و **نیمه همبسته**[2] و ناهمبسته.

۱-۴-۳ همبستگی سطح مشترک

سطح مشترک کاملاً همبسته[3]

هرگاه دو بلور در صفحه سطح مشترک کاملاً با یکدیگر همخوانی داشته باشد، به طوری که دو شبکه در سرتاسر سطح مشترک پیوستگی داشته باشد، **فصل مشترک همبسته** به دست می‌آید (شکل ۳۲-۳). این امر فقط در صورتی امکان پذیر است که بدون در نظر گرفتن شیمی ذرات، در صفحه سطح مشترک، آرایش اتمی دوفاز یکسان باشد و بایسته این امر آن است که دو بلور نسبت به هم درجهت مناسبی قرار گرفته باشد. برای مثال ، چنین سطح مشترکی بین فاز hcp سرشار از سیلسیم κ و

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

فاز fcc غنی از مس α در آلیاژهای Cu-Si ایجاد می شود. پارامتر شبکه این دو فاز به گونه ای است که صفحه fcc (۱۱۱) و صفحه hcp (۰۰۰۱) یکسان باشد. این دو صفحه ، صفحه های *پردانسیته*[۴] است و در این مثال خاص، فاصله بین اتم ها نیز یکسان است (شکل ۳۳-۳) . بنابراین هنگامی که دو بلور در امتداد صفحه های متراکم و در جهت موازی جهت پردانسیته به یکدیگر متصل شود، فصل مشترک کاملاً همبسته ایجاد می شود . بایسته قرار گرفتن صفحه ها و جهت های پردانسیته به طور موازی با هم این است که بین دو فاز رابطه آرایش بلوری زیر برقرار شود.

$$(111)_\alpha // (0001)\kappa$$
$$[\bar{1}10]_\alpha // [11\bar{2}0]\kappa$$

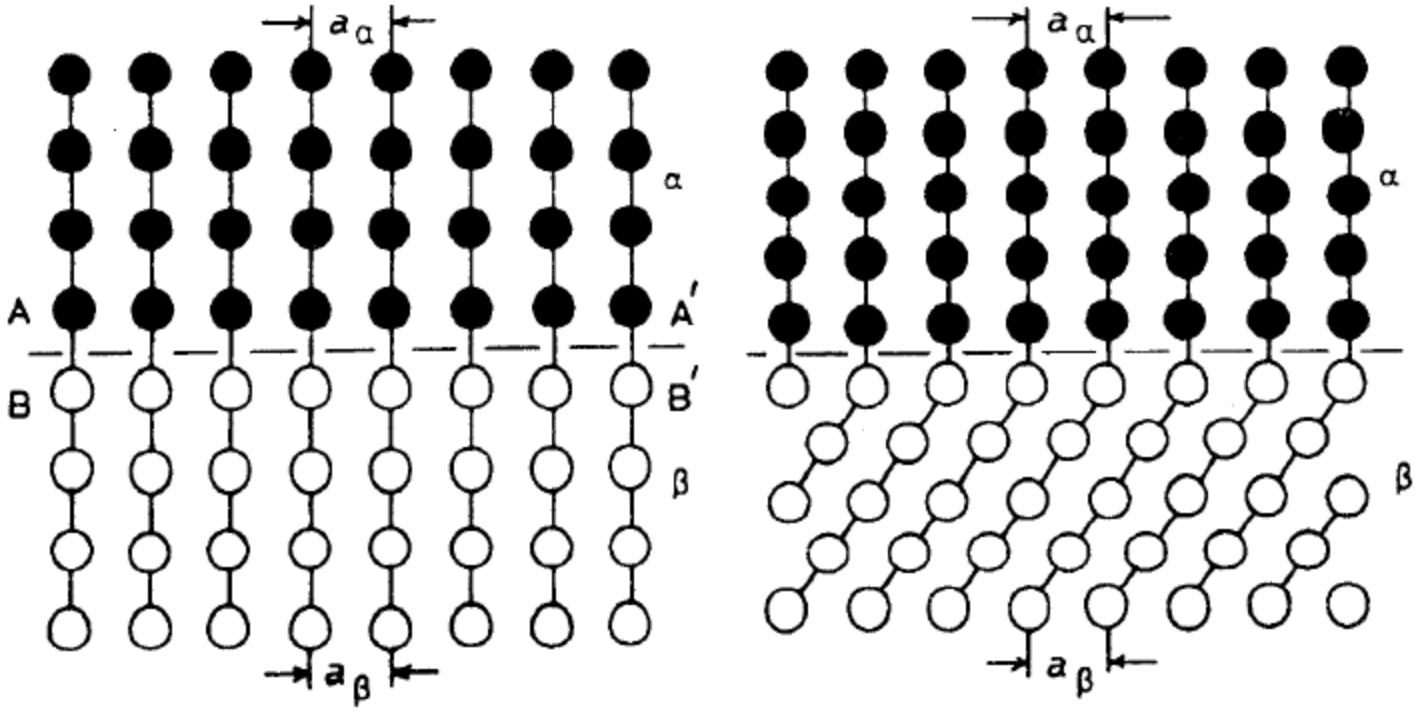
توجه داشته باشید که رابطه آرایش بلوری همیشه با وجود دو صفحه موازی (hkl) و دو جهت موازی [uvw] در این صفحه ها مشخص می شود.

در هر فاز، هر اتم آرایش و نظم بهینه ای از نزدیکترین اتم های همسایه را دارد، تاانرژی پایینی ایجاد کند.اما در سطح مشترک معمولاً تغییر در ترکیب شیمیایی وجود دارد، به طوری که هر اتم تا

1. Coherent 2. Semicoherent 3. Fully coherent interfaces
4. Close-packed

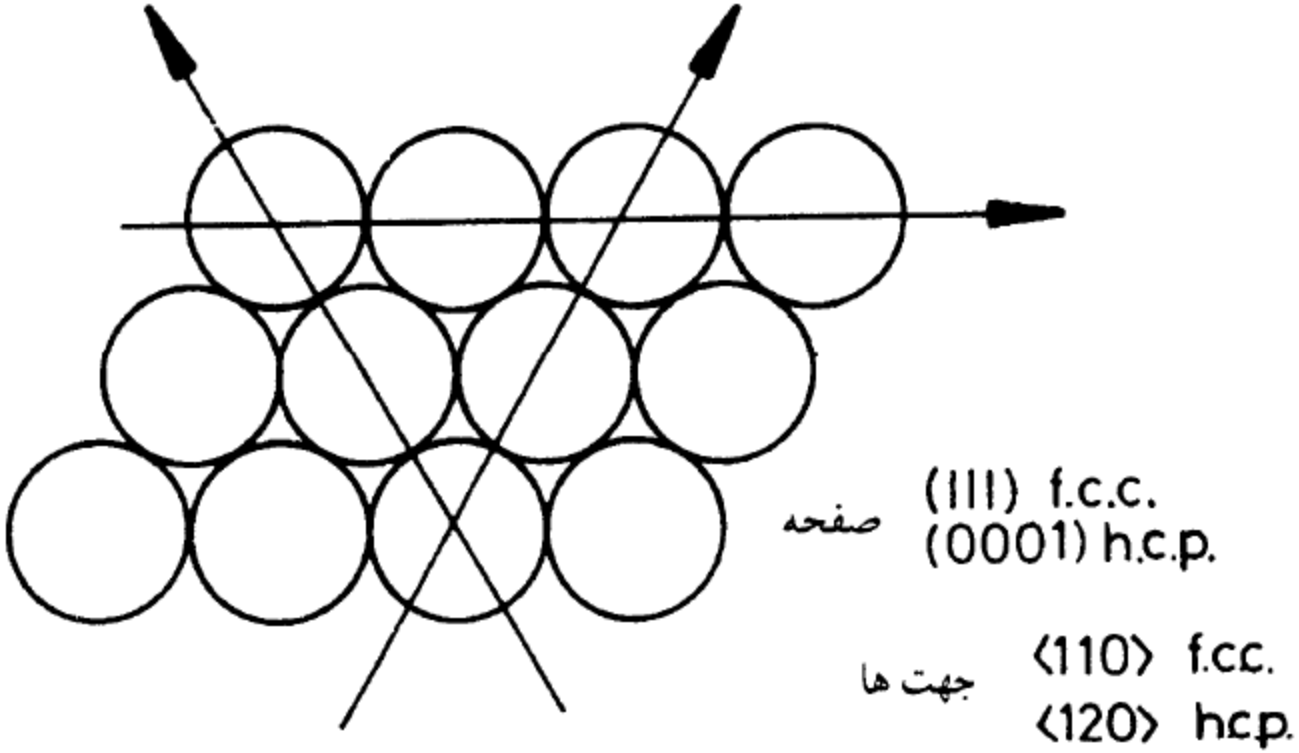
www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

حدی با اتم های همسایه ناهمنام اتصال برقرار می سازد.



شکل ۳۲-۳ : سطوح مشترك همبسته بدون کرنش (الف) هر بلور یك ترکیب شیمیایی متفاوت دارد ، اما ساختار بلوری آنها یکسان است. (ب) دو فاز شبکه‌های بلوری متفاوت دارد .

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد



شکل ۳۳-۳ : صفحه و جهت‌های پردانسیته در ساختارهای fcc ، hcp

این امر به افزایش انرژی اتم های سطح مشترک می انجامد ، بخشی از انرژی سطح مشترک از این امر ناشی می شود (γ_{ch}). برای سطح مشترک همبسته فقط همین بخش ایجاد می شود، یعنی

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

$$\gamma(\text{همبسته}) = \gamma_{ch} \qquad (۳-۲۹)$$

درمورد سطح مشترک $\alpha - \kappa$ در آلیاژهای Cu - Si انرژی سطح مشترک پایین و نزدیک به $1\ mJ\ m^{-2}$ تخمین زده شده است. معمولاً انرژی سطح مشترک همبسته در گستره‌ای تا $200\ mJ\ m^{-2}$ قرار دارد.

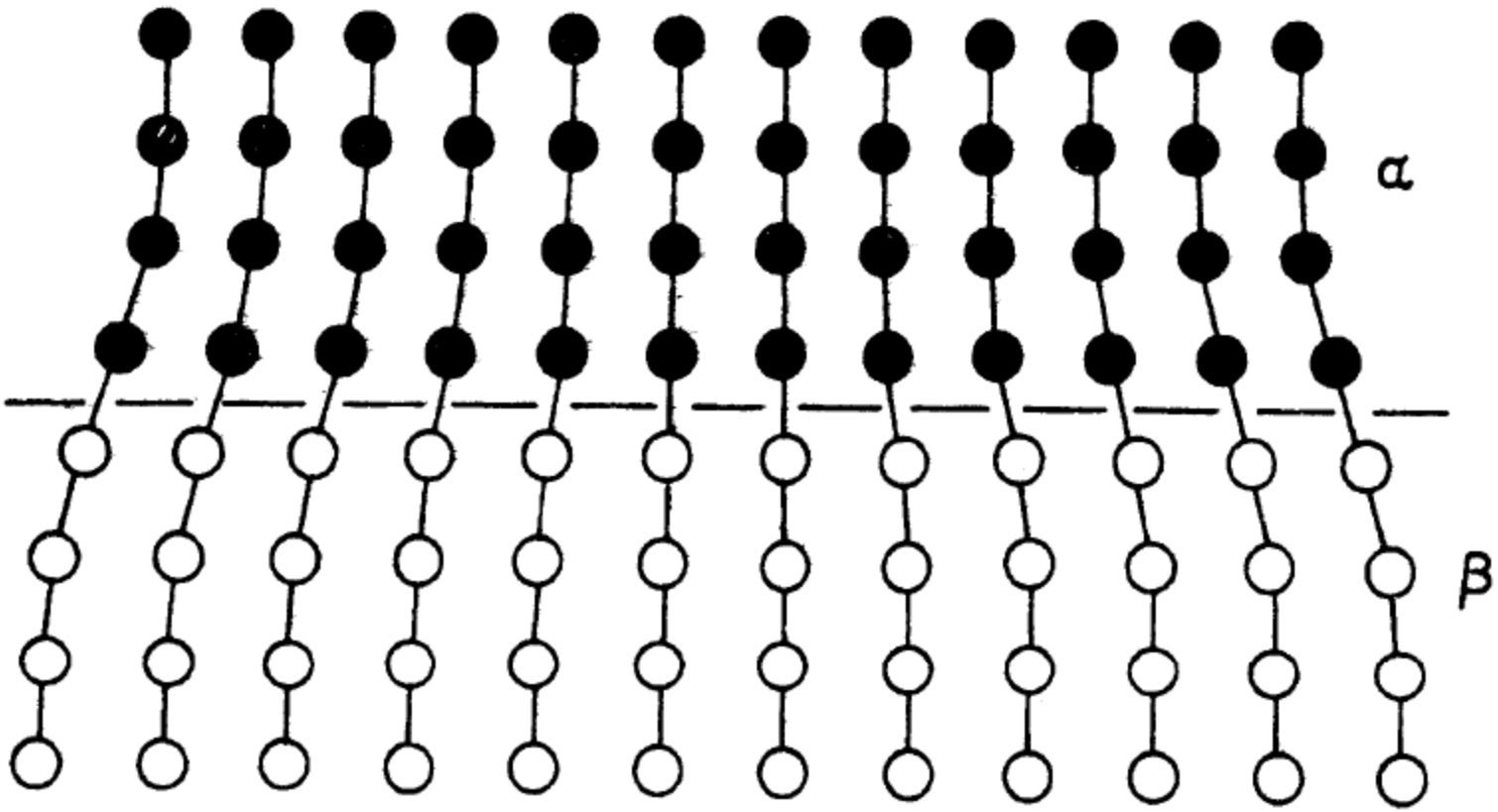
در مورد سطح مشترک hcp/ fcc فقط یک صفحه وجود دارد که می‌تواند یک سطح مشترک همبسته ایجاد کند و هیچ صفحه یکسان دیگری در دو شبکه بلوری وجود ندارد. اما اگر دو فاز مجاور دارای ساختار بلوری و پارامتر شبکه‌ای یکسان باشد و فقط از نظر ترکیب شیمیایی تفاوت داشته باشد، تمام صفحه های شبکه ای یکسان است.

هنگامی که فاصله بین اتم ها در سطح مشترک یکسان نباشد، سطح مشترک همبسته به وسیله تغییر شکل در یک یا دو شبکه می‌تواند ایجاد شود که در شکل ۳-۳۴ نشان داده شده است. تغییر شکل ایجاد شده در شبکه را به نام کرنش یا **تغییر شکل همبستگی**[1] می‌شناسند.

---

1. Coherency strain

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد



شکل ۳۴-۳ : سطح مشترك همبسته با اندکی ناهمخوانی در دو شبکه که به کرنش همبستگی در دو شبکه مجاور هم منجر می‌شود .

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

سطح مشترک نیمه همبسته[1]

کرنش همراه با سطح مشترک همبسته، انرژی کل سیستم را افزایش می‌دهد و هر گاه ناهمخوانی دو شبکه به اندازه کافی بزرگ باشد، یا مساحت سطح مشترک همبسته به وسیله سطح مشترک نیمه همبسته تعویض و جایگزین شود و در این صورت ناهمخوانی به وسیله ***نابجایی ناهمخوان***[2] جذب و کاهش می‌یابد (شکل ۳۵-۳).

اگر a_α و a_β به ترتیب پارامترهای شبکه α و β در حالت تحت تنش باشند، ناهمخوانی (δ) بین دو شبکه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\delta = \frac{a_\beta - a_\alpha}{a_\alpha} \qquad (۳-۳۰)$$

می‌توان نشان داد که در شبکه یک بُعدی ، یا ایجاد یک سری نابجایی های لبه ای، ناهمخوانی شبکه ای می‌تواند کاملاً از بین برود، بدون اینکه هیچ میدان کرنش بزرگی به وجود آید. فاصله بین نابجایی ها D از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$D = \frac{\alpha\beta}{\delta} \qquad (۳-۳۱)$$

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

برای δ کوچک به صورت تقریب داریم:

$$D \simeq \frac{b}{\delta} \qquad (۳-۳۲)$$

که $b = (a_\alpha + a_\beta)/2$ بُردار برگر نابجایی است، در این حالت همخوانی در سطح مشترک تقریباً برقرار است ، بجز در پیرامون مرکز نابجایی ها که ساختار بلوری بسیار اعوجاج داشته و صفحه های اتمی ناپیوستگی دارد.

در عمل ناهمخوانی معمولاً در دو بُعد وجود دارد، در این صورت میدان های کرنشی همبستگی به وجود آمده به وسیله دو سری نابجایی ناموازی با فاصله $D_1 = b_1 / \delta_1$ و $D_2 = b_2/\delta_2$ جذب و خنثی می شود (شکل ۳۶-۳). اگر به دلایلی فاصله بین نابجایی ها بزرگ تر از آنچه باشد که از

1. Semicoherent interfaces
2. Misfit dislocation

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

رابطه ۳۲-۳ به دست می‌آید. بخشی از کرنش همبسته شدن به وسیله نابجایی های ناهمخوانی خنثی می شود و میدان های کرنشی بزرگ باقی مانده همچنان وجود خواهد داشت.

انرژی سطح مشترک نیمه همبسته از دو بخش تشکیل شده است: (الف) ناشی از اختلاف نوع اتم ها، γ_{ch} ، همانطور که برای سطح مشترک همبسته بیان شد و (ب) γ_{st} ، که انرژی اضافی ناشی از اعوجاج ساختار ناشی از نابجایی های ناهمخوانی است، پس

$$\gamma(\text{نیمه هم بسته}) = \gamma_{ch} + \gamma_{st} \qquad (۳-۳۳)$$

معادله ۳۲-۳ نشان می‌دهد که با افزایش δ فاصله بین نابجایی ها کم می‌شود. برای مقادیر کم δ بخش ساختاری انرژی ، γ_{st} تقریباً متناسب با دانسیته نابجایی ها در سطح مشترک است، بنابراین:

$$\gamma_{st} \propto \delta \ (\text{برای مقادیر کم } \delta) \qquad (۳-۳۴)$$

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

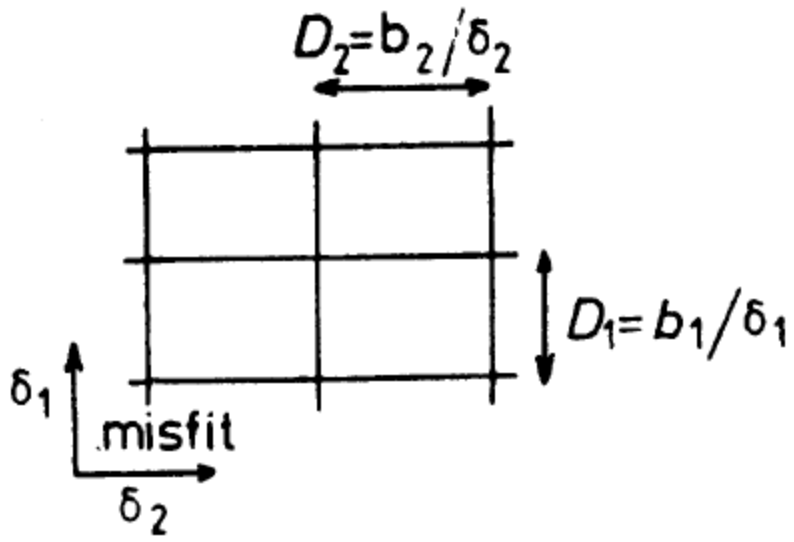
اما γ_{st} با افزایش δ با سرعت کمتری افزایش می یابد و در صورتی که $\delta \simeq 0.25$ آنگاه γ_{st} تقریباً به آستانه ای معین می رسد که همانند تغییرات انرژی مرز دانه با θ است که در شکل ۹-۳ نشان داده شده است. دلیل چنین رفتاری این است که همراه با کاهش فاصله بین نابجایی ها میدان کرنشی ناشی از نابجایی ها با یکدیگر برخورد کرده و یکدیگر را خنثی می کند .ا نرژی سطوح مشترک نیمه همبسته معمولاً در گستره $mJ\ m^{-2}$ ۲۰۰-۵۰۰ است.

وقتی $\delta >$ ۰/۲۵ یعنی یک نابجایی به ازاء هر چهار فاصله بین صفحه های اتمی موجود باشد، مناطق پیرامون مرکز نابجایی که دارای همخوانی ضعیفند با یکدیگر تداخل می کند و سطح مشترک را نمی توان همانند فصل مشترک همبسته دانست، بلکه سطح مشترک ناهمبسته ایجاد می شود.

سطح مشترك ناهمبسته

هرگاه صفحه سطح مشترک دو فاز مجاور هم از نظر نظم اتمی اختلاف زیادی داشته باشد هیچگونه همخوانی در سطح مشترک بین دوفاز نمی تواند ایجاد شود. آرایش اتم ها در دوفاز ممکن است بسیار متفاوت باشد و یا در صورت یکسان بودن، فاصله بین اتم ها ممکن است اختلافی بیش از ۲۵ درصد داشته باشد. در هر دو حالت به سطح مشترک، ناهمبسته می گویند.

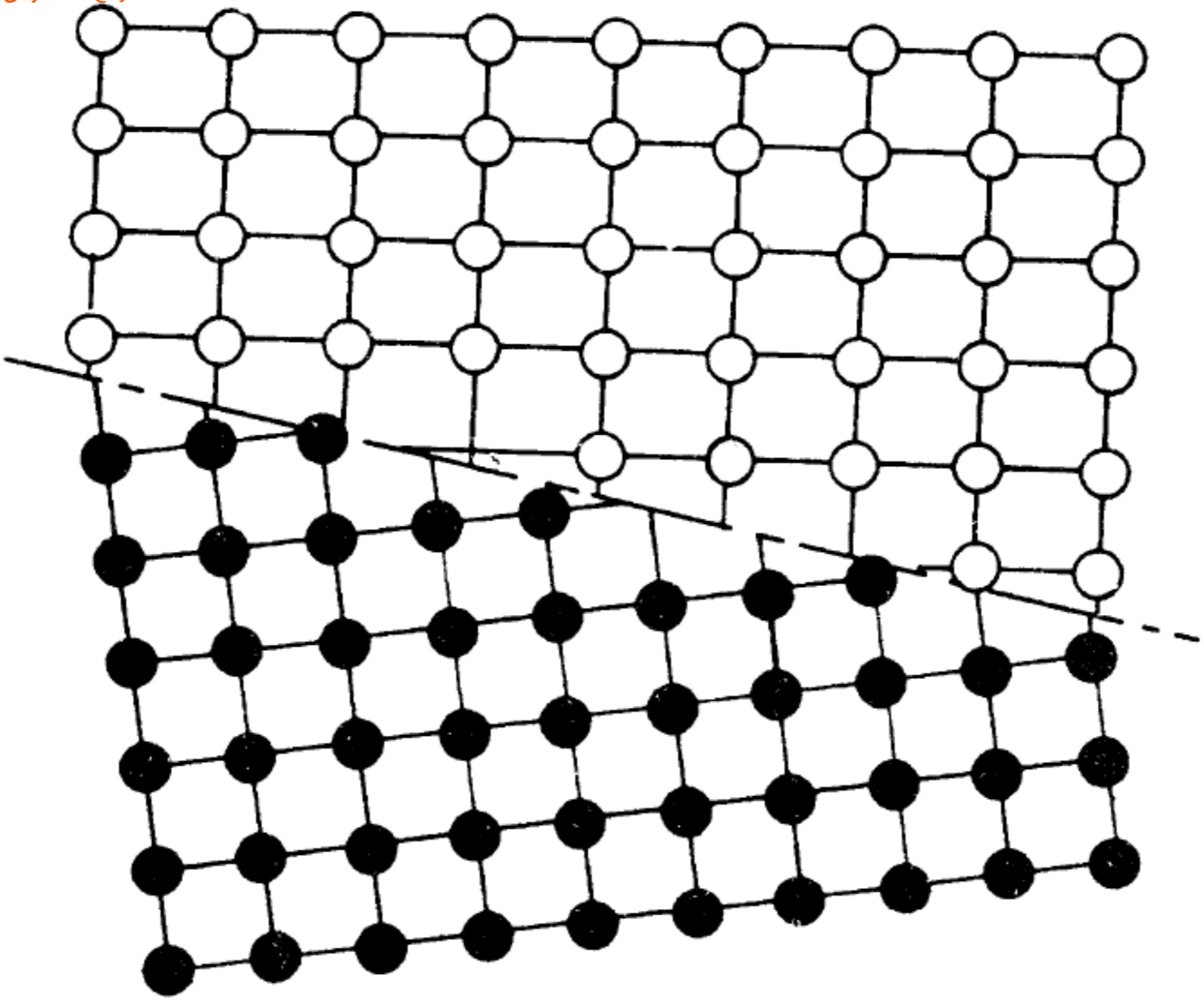
www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد



شکل ۳۶-۳: ناهمخوانی در دو جهت (δ_1 و δ_2) به وسیله دو سری نابجایی پله‌ای با فاصله $D_1 = b_1 / \delta_1$ و $D_2 = b_2 / \delta_2$ می‌تواند خنثی و جذب شود.

معمولاً فصل مشترک ناهمبسته هنگامی به وجود می‌آید که دو بلور به طور اتفاقی نسبت به یکدیگر مرتب شده، در عرض هر سطح مشترک با یکدیگر اتصال یابد. همچنانکه در شکل ۳۷-۳

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد



شکل ۳۷-۳ : سطح مشترک ناهمبسته

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

نشان داده شده است . اگر سطح مشترک در دو فاز ساختار متفاوتی داشته باشد ***روابط بلوری***[1] **معلوم** نیز بین بلورها ممکن است به وجود آید.

اطلاعات بسیار اندک درباره ساختار اتمی سطح مشترک ناهمبسته وجود دارد، اما خصوصیات این سطوح مشترک همانند مرز دانه های با زاویه زیاد است. برای مثال آنها دارای انرژی بالایی ($500\text{-}1000 mJ\ m^{-2}$) بوده که نسبتاً به صفحه سطح مشترک حساس نیست. این سطوح مشترک احتمالاً ساختار اتمی نامنظم دارد که برخلاف سطوح مشترک همبسته و نیم همبسته بدون تناوب طولانی است و دانه های با زاویه زیاد، ممکن است ساختار همانند پله ای داشته باشد که در اثر بروز در صفحات با اندیس پایین در سطح مشترک ایجاد می شود، همانند شکل ۳۲-۳، ب.

1. Orientation relationship