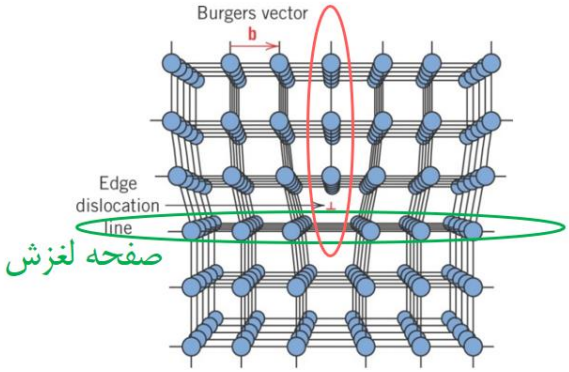
فصل پنجم:

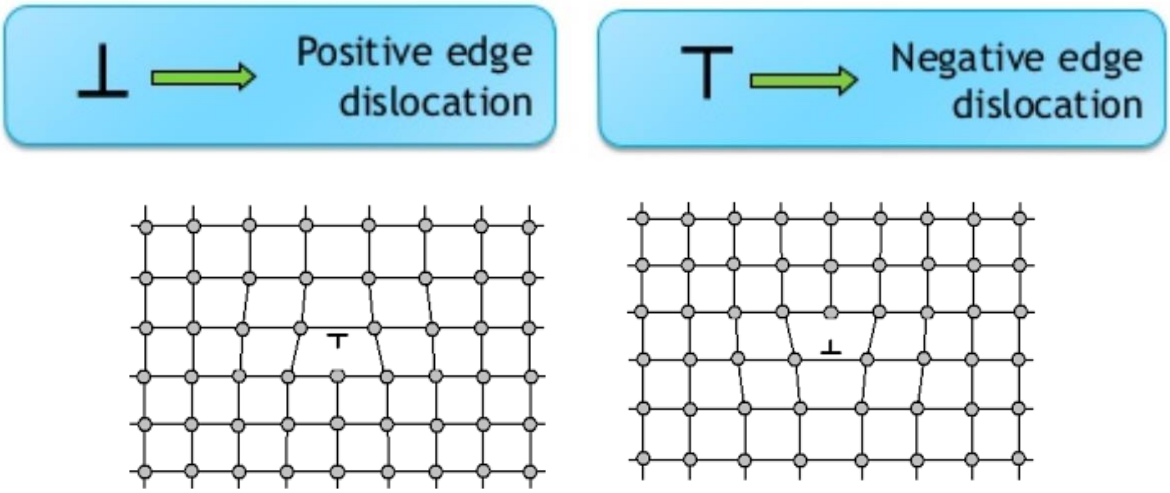
تئوری نابجایی‌ها

اهمیت نابجایی ها ← عامل اصلی در تعیین رفتار مکانیکی فلزات

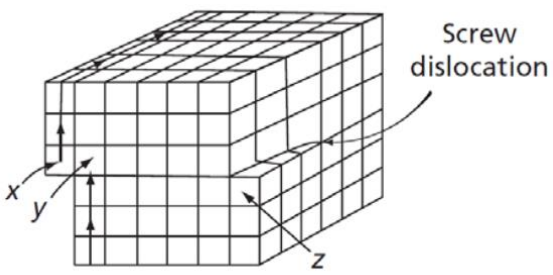
انواع نابجایی:

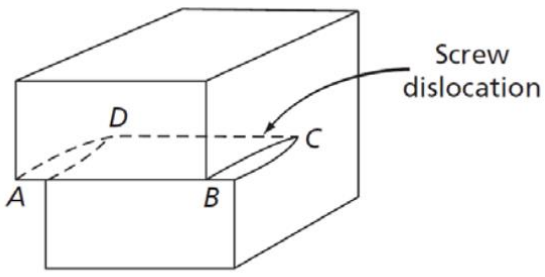
الف) نابجایی لبه ای (Edge dislocation)

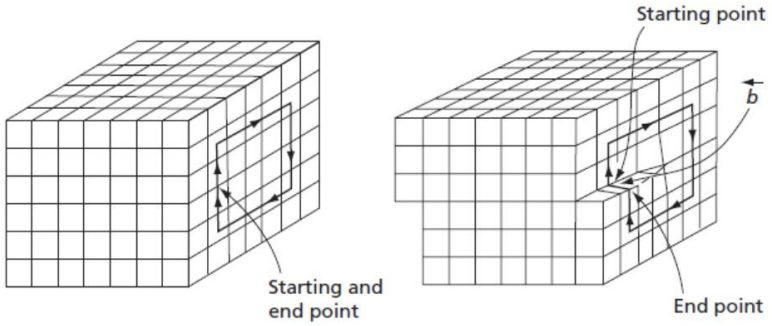


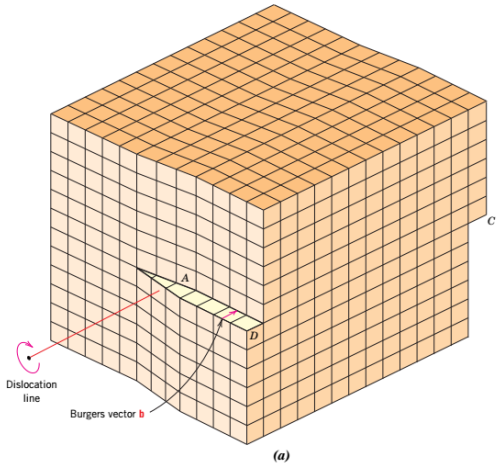


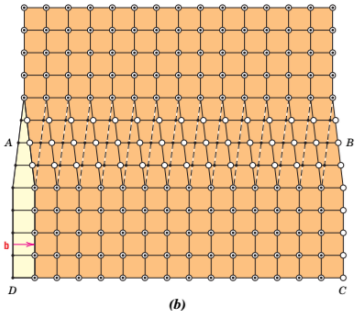
ب) نابجایی پیچی (Screw dislocation)





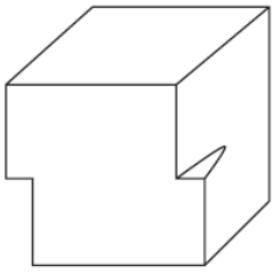


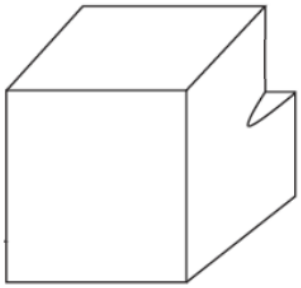




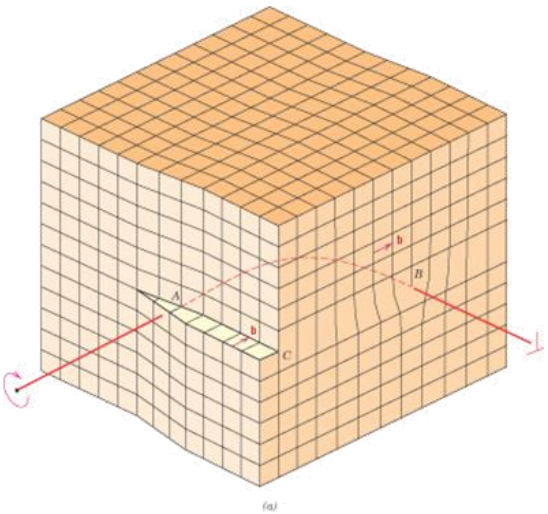
نابجایی پیچی راست‌گرد

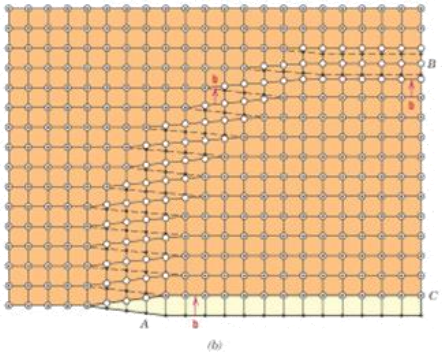
نابجایی پیچی چپ‌گرد





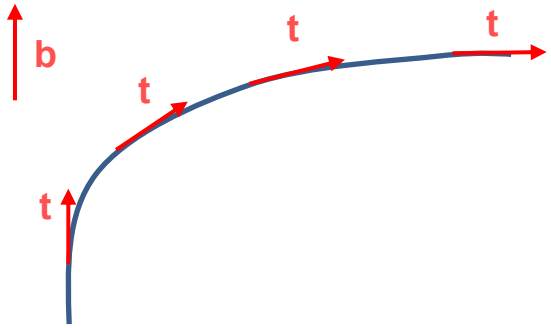
ج) نابجایی ترکیبی (Mixed dislocation)



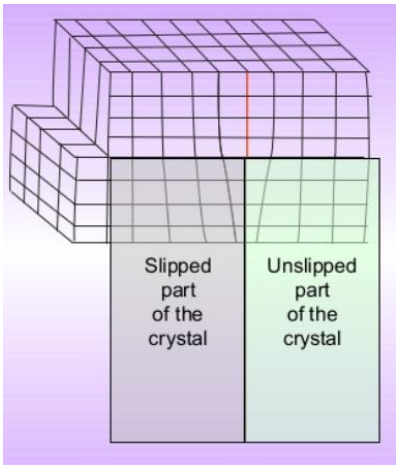


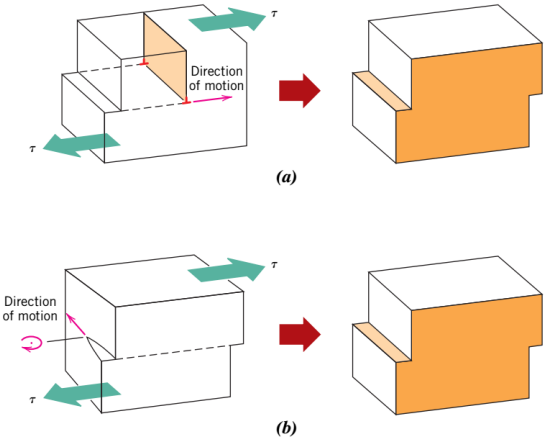
به طور کلی هر نابجایی به وسیله دو پارامتر بردار برگرز و خط نابجایی مشخص می‌شود.

برای نشان دادن ماهیت نابجایی در یک نقطه از خطوط نابجایی منحنی از بردار برگرز، b، و بردار واحد مماس بر خط نابجایی، t، استفاده می شود.



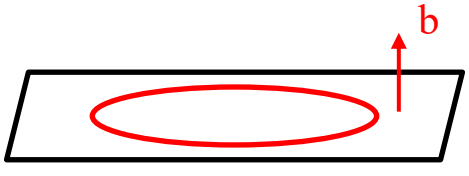
نابجایی‌ها مرز بین قسمت‌های لغزش یافته و نیافته هستند. بنابراین لازم است که دو سر خط نابجایی به عیوبی مانند مرزدانه منتهی شود یا به هم چسبیده باشند یا نابجایی به صورت حلقه‌ای باشد.

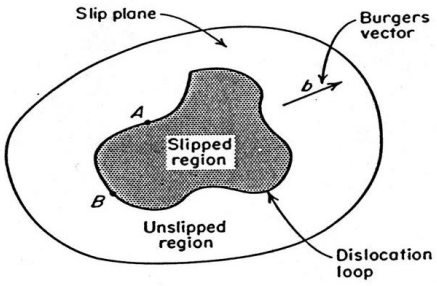




در خیلی از موارد نابجایی‌ها به صورت منحنی یا حلقه‌ای بوده و از آنجا که هر نابجایی فقط یک بردار برگرز دارد، ماهیت نابجایی (لبه ای، پیچی یا ترکیبی) در قسمت‌های مختلف متفاوت است.

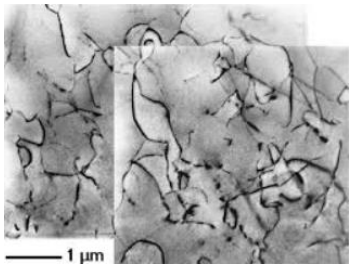
تصویر یک نابجایی حلقه‌ای (dislocation loop) درون صفحه لغزش خود:





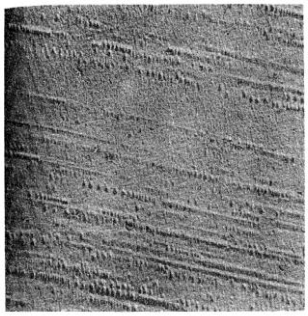
نحوه مشاهده نابجایی‌ها:

۱- میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)



۲. اشعه X

۳. استفاده از محلول حک نابجایی: محلول شیمیایی که به دلیل انرژی کرنشی ایجاد شده توسط نابجایی، مکان‌های حضور نابجایی را مورد حمله قرار داده و ایجاد یک حفره در مکان نابجایی می‌کند.



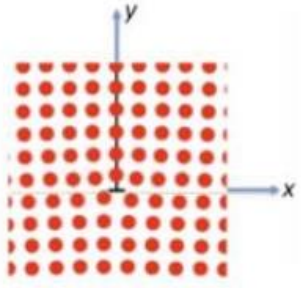
Etch pits on slip bands in alpha brass crystals (5,000 ×). *(From J. D. Meakin and H. G. F. Wilsdorf, Trans. Metall. Soc. AIME, vol. 218, p. 740, 1960.)*

میدان‌های تنشی و انرژی نابجایی‌ها:

وجود نابجایی در یک شبکه بلوری باعث ایجاد یک میدان تنشی در اطراف نابجایی می‌شود. همچنین وجود نابجایی باعث افزایش انرژی آزاد شبکه بلوری می‌شود. (برعکس جای‌خالی‌ها که مقدار مشخصی از آنها از نظر ترمودینامیکی پایدارند.) هدف در این قسمت محاسبه میدان تنشی اطراف نابجایی و انرژی خط نابجایی برای انواع مختلف نابجایی است.

الف) نابجایی لبه‌ای:

خط نابجایی به موازات محور z (عمود بر صفحه) بوده و کرنش در آن جهت صفر است. بنابراین مسأله به صورت کرنش صفحه‌ای حل می‌شود.



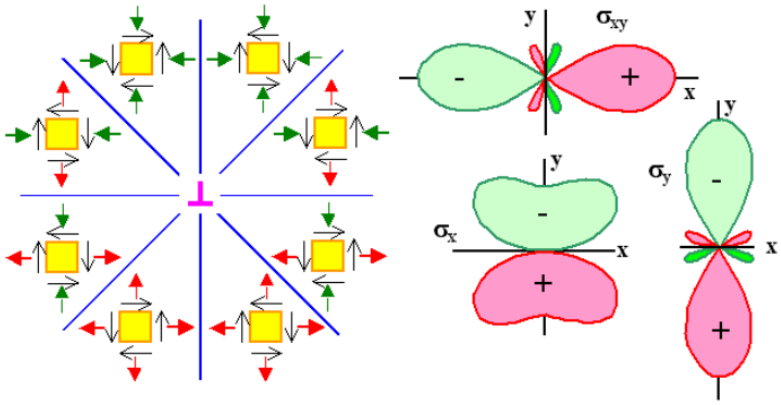
مؤلفه‌های تنش به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\sigma_x = -\tau_0 \frac{by(3x^2 + y^2)}{x^2 + y^2} \qquad \sigma_y = \tau_0 \frac{by(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^2}$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) = \frac{2\tau_0 \nu y}{x^2 + y^2} \qquad \tau_{xy} = \tau_0 \frac{bx(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^2}$$

$$\tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \qquad \tau_0 = \frac{G}{2\pi(1 - \nu)}$$

بزرگ‌ترین تنش عمودی σ_x در امتداد x است که در بالای صفحه لغزش فشاری و در زیر صفحه لغزش کششی است. تنش برشی τ_{xy} در صفحه لغزش ($y = 0$) حداکثر است.



مؤلفه‌های تنش در مختصات قطبی:

$$\sigma_r = \sigma_\theta = \frac{-\tau_0 b \sin\theta}{r} \qquad \tau_{r\theta} = \tau_{\theta r} = \tau_0 \frac{b\cos\theta}{r}$$

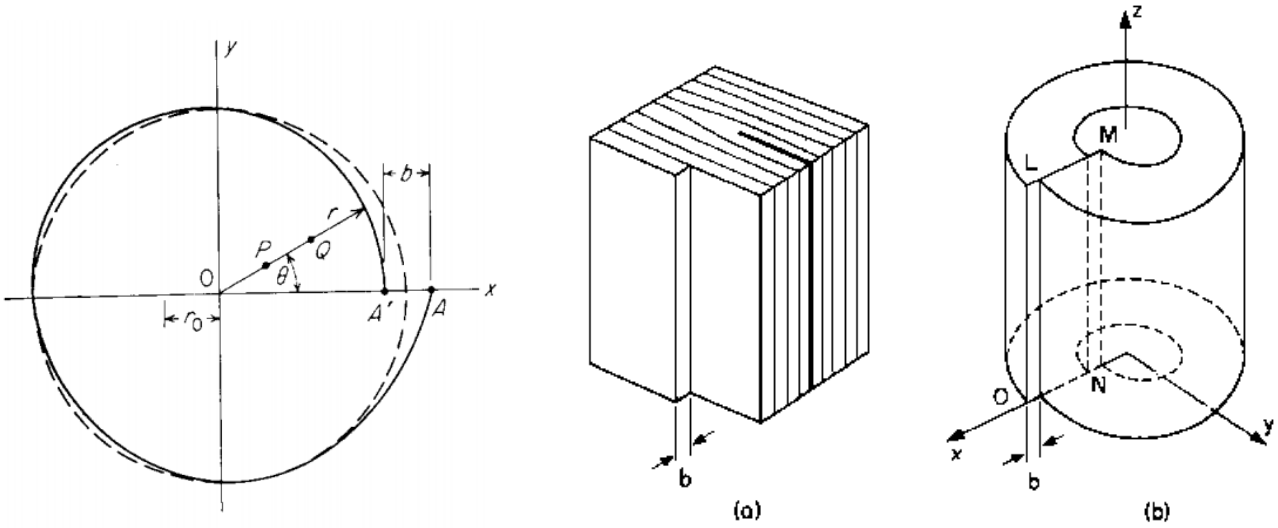
انرژی نابجایی لبه‌ای:

انرژی یک نابجایی برابر با مقدار کار لازم برای جابجایی کل محدوده تنش نابجایی به اندازه بردار برگرز (b) در امتداد صفحه لغزش است. برای یک نابجایی لبه‌ای:

$$\Longrightarrow U_E = \frac{1}{2}\int_{r_0}^{R} \tau_0 \; b^2 \cos\theta \;\; \frac{dr}{r} U_E = \frac{1}{2}\int_{r_0}^{R} \tau_{r\theta} \; b \; dr$$

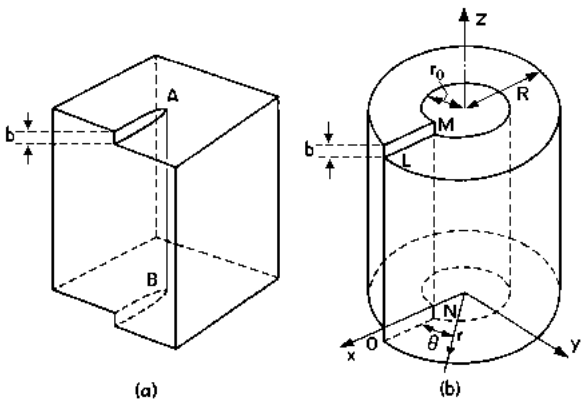
در امتداد صفحه لغزش $y = 0$ و $cos\ \theta = 1$، در نتیجه:

$$U_E = \frac{Gb^2}{4\pi(1-\vartheta)} Ln \frac{R}{r_0}$$



ب) نابجایی پیچی:

برای نابجایی پیچی فقط دو مؤلفه تنش غیر صفر داریم که تنش های برشی زیر هستند:



$$\tau_{yz} = \frac{Gb}{x} \frac{2\pi}{x^2 + y^2} \qquad \tau_{xz} = -\frac{Gb}{2\pi} \frac{y}{x^2 + y^2}$$

در مختصات استوانه‌ای:

$$\tau_{\theta z} = \frac{Gb}{2\pi r}$$

انرژی نابجایی پیچی:

$$U_S = \frac{1}{2}\int_{r_0}^{R} \tau_{\theta z}\ b\ dr = \frac{Gb^2}{4\pi} Ln\frac{R}{r_0}$$

از آنجا که مقادیر تنش و در نتیجه انرژی در فواصل بسیار نزدیک به مرکز نابجایی طبق روابط زیر به سمت بی نهایت می رود:

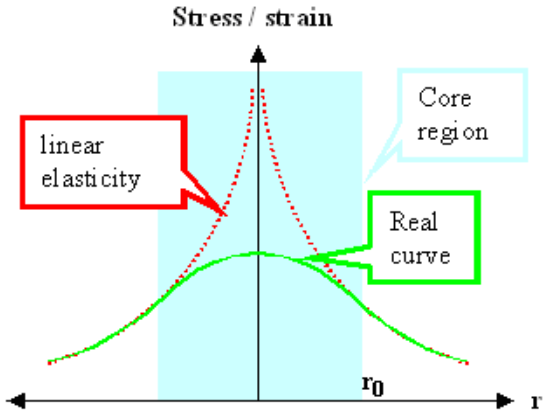
$$r_0 \to 0 \quad \Rightarrow \quad \tau \to \infty$$

به همین دلیل، یک ناحیه بسیار کوچک اطراف خط نابجایی را از محاسبه انرژی مستثنی می کنند. معمولاً r_0 را برابر با b می گیرند و مقادیر تخمینی قابل قبولی از انرژی به دست می آید. در این حالت، انرژی هسته نابجایی (U_0) بسیار کمتر از انرژی کل کشسان نابجایی (U) می شود.

پس در حقیقت دو رابطه انرژی به صورت زیر در می‌آیند:

$$U_E = \frac{Gb^2}{4\pi(1-\vartheta)} Ln\frac{R}{b} \qquad\qquad U_S = \frac{Gb^2}{4\pi} Ln\frac{R}{b}$$

مقدار R (حداکثر شعاع اثر تنش نابجایی) را معمولاً نصف فاصله متوسط بین نابجایی‌ها در نظر می‌گیرند (تمام خطوط نابجایی موازی فرض می‌شوند.). اگر یک تک نابجایی بررسی شود $R \approx 2000b$ در نظر گرفته می‌شود.



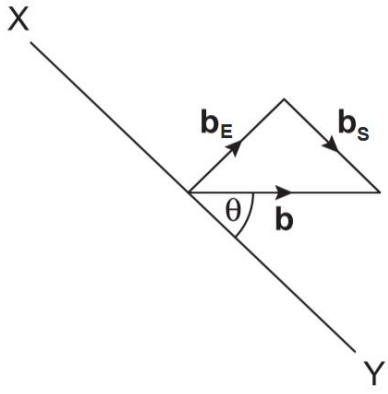
ج) نابجایی ترکیبی:

همانطور که گفته شد در نابجایی ترکیبی، بردار برگرز با خط نابجایی زاویه بین ۰ تا ۹۰ درجه می‌سازد. برای انجام محاسبات برای نابجایی ترکیبی آنرا به مؤلفه‌های لبه‌ای و پیچی تجزیه می‌کنیم:

$$U_{Mixed} = U_E + U_S = \frac{Gb_E^2}{4\pi(1-\vartheta)} Ln\frac{R}{b} + \frac{Gb_S^2}{4\pi} Ln\frac{R}{b}$$

$$U_{Mixed} = \frac{Gb^2 \sin^2\theta}{4\pi(1-\vartheta)} Ln\frac{R}{b} + \frac{Gb^2 \cos^2\theta}{4\pi} Ln\frac{R}{b}$$

$$U_{Mixed} = \frac{Gb^2}{4\pi}\left(\frac{\sin^2\theta}{(1-\vartheta)} + \cos^2\theta\right) Ln\frac{R}{b}$$



نکات مربوط به روابط انرژی انواع نابجایی:

۱. چون لگاریتم یک عدد بزرگ به آرامی تغییر می‌کند، $Ln(\frac{R}{b})$ را می‌توان ثابت فرض کرد و رابطه کلی زیر را برای انرژی نابجایی نوشت:

$$U = \alpha G b^2$$

(این رابطه به طور کلی و برای همه نابجایی ها استفاده می شود، بررسی ها نشان می دهند که: $0.5 < \alpha < 1$

۲. مقادیر انرژی محاسبه شده در روابط بالا برای واحد طول خط نابجایی هستند و برای محاسبه انرژی کلی یک خط نابجایی، مقادیر بالا را باید در طول خط نابجایی ضرب کرد:

$$U = \alpha l G b^2$$

l: طول خط نابجایی

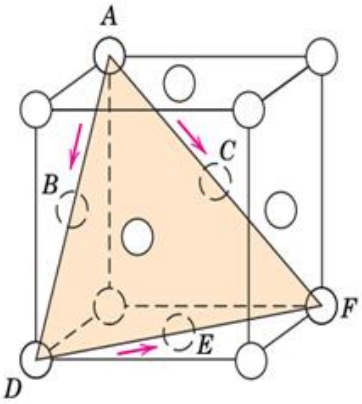
۳. انرژی نابجایی متناسب با مجذور بردار برگرز است:

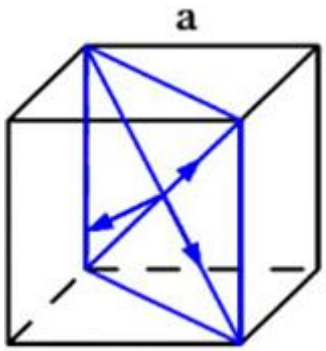
$$U \propto b^2$$

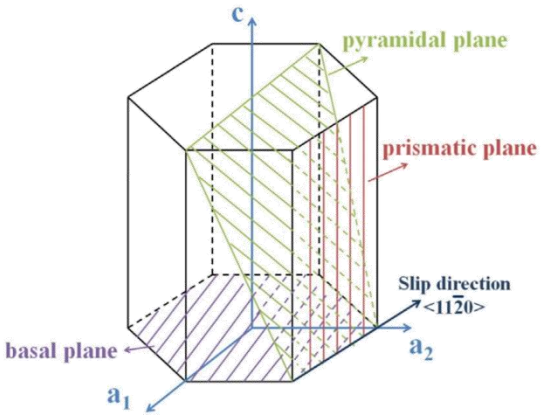
از آنجا که سیستم از نظر ترمودینامیکی تمایل به داشتن حداقل انرژی را دارد، لذا نابجایی‌ها، کوچک‌ترین بردارهای برگرز ممکن را انتخاب می‌کنند.

بردارهای برگرز نابجایی های شبکه‌های بلوری مختلف عبارتند از:

FCC: $|\vec{b}| = \frac{1}{2}\langle 110\rangle$ BCC: $|\vec{b}| = \frac{1}{2}\langle 111\rangle$ HCP: $|\vec{b}| = \frac{1}{3}\langle 11\bar{2}0\rangle$







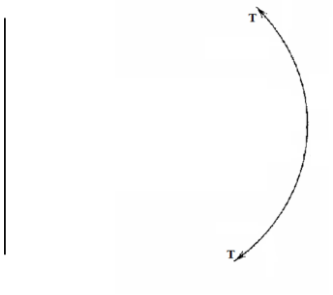
Main slip systems in hcp crystal lattice.

۴. با توجه به رابطه ارائه شده در مورد ۲، مشاهده می شود که انرژی کلی نابجایی با طول آن رابطه مستقیم دارد:

$$U \propto l$$

در نتیجه برای کاهش انرژی، خطوط منحنی نابجایی تلاش در مستقیم شدن خواهند کرد. این تلاش تحت عنوان نیروی کشش خطی نابجایی (Line tension) نامیده می‌شود.

کشش خطی نابجایی را توسط رابطه زیر نشان می‌دهند:



$$T = \frac{dU}{dl} = \frac{d(\alpha l G b^2)}{dl} = \alpha G b^2 \approx G b^2$$

اگر α قید نشود آن را برابر با ۱ فرض می‌کنیم.

کشش خطی عبارت است از تغییر میزان انرژی نابجایی نسبت به تغییر طول واحد آن.

۵. مقایسه مقدار انرژی خط نابجایی لبه ای و پیچی نشان می دهد که:

$$\frac{U_{Screw}}{U_{Edge}} = 1 - \vartheta \quad if \ \vartheta = \frac{1}{3} \qquad \Longrightarrow \frac{U_{Screw}}{U_{Edge}} = \frac{2}{3}$$

۶. با توجه به اصل کاهش انرژی در یک شبکه بلوری (سیستم ترمودینامیکی)، در شرایطی که در اثر تجزیه شدن یک نابجایی به ۲ نابجایی انرژی کاسته شود، این کار صورت خواهد گرفت:

$$\vec{b} \longrightarrow \vec{b}_1 + \vec{b}_2$$

شرط لازم برای تجزیه نابجایی بالا:

$$b^2 > b_1^2 + b_2^2 U_b > U_{b_1} + U_{b_2} \quad \Longrightarrow \alpha G b^2 > \alpha G b_1^2 + \alpha G b_2^2 \Longrightarrow$$

به این رابطه، قانون فرانک (Frank Law) گفته می شود که شرط لازم برای تجزیه یک نابجایی را معرفی می کند.

شرط دیگر این تجزیه آن است که این تجزیه از نظر برداری امکان پذیر باشد.

مثال:

نشان دهید که در شبکه BCC نابجایی ها با بردار برگرز $a\langle 110\rangle$ تمایل به تجزیه شدن به دو نابجایی با بردار برگرز $\frac{a}{2}\langle 111\rangle$ دارند.

حل:

$$\boldsymbol{a[110] \rightarrow \frac{a}{2}[111] + \frac{a}{2}[11\bar{1}]}$$

شرط لازم برای قانون فرانک:

$$\boldsymbol{b^2_{a[110]} > b^2_{\frac{a}{2}[111]} + b^2_{\frac{a}{2}[11\bar{1}]}}$$

$$\boldsymbol{b_{a[hkl]} = a\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

$$\boldsymbol{b_{a[110]} = a\sqrt{1^2 + 1^2 + 0^2} = a\sqrt{2}}$$

$$\boldsymbol{b_{\frac{a}{2}[111]} = b_{\frac{a}{2}[11\bar{1}]} = \frac{a\sqrt{3}}{2}}$$

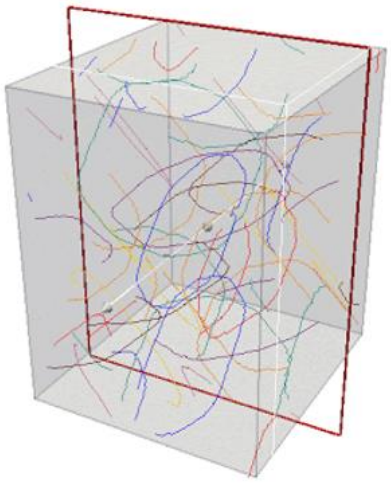
نتایج را در رابطه فرانک قرار می دهیم:

$$\boldsymbol{(a\sqrt{2})^2 > (a\frac{\sqrt{3}}{2})^2 + (a\frac{\sqrt{3}}{2})^2 \quad \Longrightarrow \quad 2 > \frac{3}{2}}$$

دانسیته نابجایی:

دانسیته نابجایی عبارت است از مجموع طول خطوط نابجایی در واحد حجم یا تعداد خطوط نابجایی قطع کننده واحد سطح

واحد دانسیته نابجایی معمولاً cm^{-2} یا mm^{-2} است.



$$\rho = \frac{\text{مجموع طول خطوط نابجایی}}{\text{حجم ماده}}$$

$$\rho = \frac{\text{تعداد خطوط نابجایی}}{\text{مساحت سطح ماده}}$$

واحد دانسیته نابجایی معمولاً cm^{-2} یا mm^{-2} است.

مثال:

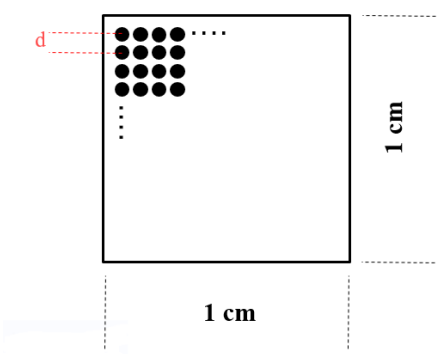
دانسیته نابجایی در یک نمونه فلزی برابر است با $10^8 cm^{-2}$. مطلوب است:

الف) محاسبه فاصله متوسط بین نابجایی‌ها

ب) تعیین متوسط انرژی واحد طول نابجایی‌ها با فرض اینکه نصف نابجایی‌ها پیچی و بقیه لبه‌ای باشند.

(مفروضات: $\vartheta = \frac{1}{3}$، $G = 26 \times 10^3 MPa$، $r = 1.25A°$ (شعاع اتم))

حل: الف) فاصله متوسط را می‌توان با فرض اینکه کلیه خطوط نابجایی موازی و متساوی‌الفاصله باشند به صورت زیر به دست آورد.



$$d = \frac{1}{\sqrt{\rho}} = \frac{1}{\sqrt{10^8}} = 10^{-4} cm$$

ب)

$$\left.\begin{array}{c} U_{Average} = \frac{1}{2}(U_{Screw} + U_{Edge}) \\ U_{Edge} = \frac{3}{2}U_{Screw} \end{array}\right\} \Longrightarrow U_{Average} = \frac{5}{4}U_{Screw}$$

مقدار انرژی در واحد طول خط نابجای پیچی:

$$U_{Screw} = \frac{Gb^2}{4\pi} Ln \frac{R}{b}$$

$$R = \frac{d}{2} = 5 \times 10^{-7} m$$

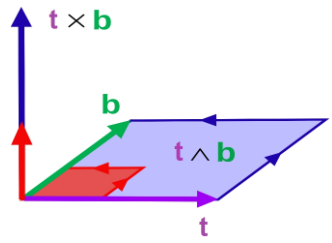
$$b = 2r = 2.5\ A° = 2.5 \times 10^{-10} m$$

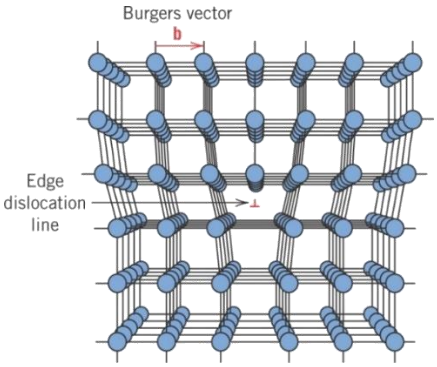
$$\Longrightarrow U_{Average} = \frac{5}{4}U_{Screw} = 1.23 \times 10^{-4} \frac{N.m}{m}$$

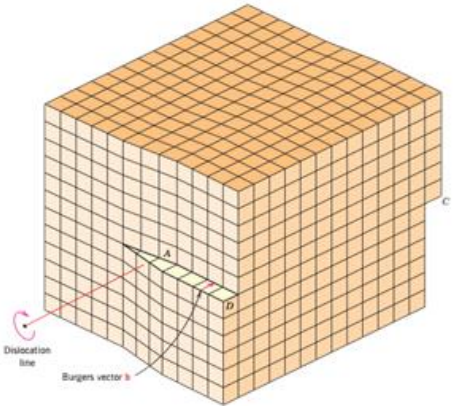
تفاوت در لغزش نابجایی لبه‌ای و پیچی:

صفحه ایجاد شده به وسیله بردار برگرز و خط نابجایی نشان دهنده صفحه لغزش است. برای نابجایی لبه‌ای، دو بردار بر هم عمود بوده و یک صفحه مشخص را نشان می‌دهند ولی در نابجایی پیچی دو بردار موازی هستند.

بنابراین برعکس نابجایی لبه‌ای که یک صفحه لغزش مشخص دارد، نابجایی پیچی می‌تواند در تعداد زیادی صفحه لغزش که بردار برگرز در آنها قرار می‌گیرد، لغزش کند.







برخورد نابجایی‌ها (Intersections of dislocations)

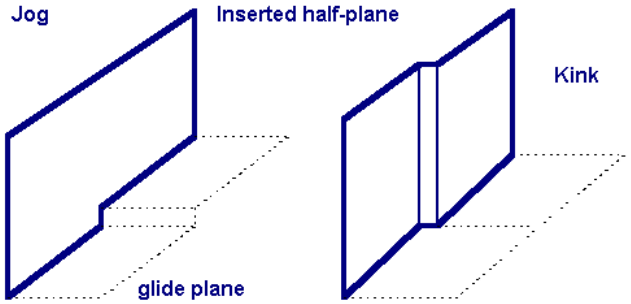
گفته شد که برای تغییرشکل پلاستیکی یک ماده چندبلور، حداقل به ۵ سیستم لغزش مستقل فعال در هر دانه نیاز است.

بنابراین از همان ابتدای تغییرشکل پلاستیکی، برخورد نابجایی‌ها درون دانه اجتناب‌ناپذیر است.

برخورد نابجایی‌ها می‌تواند منجر به ایجاد پله‌هایی در خط نابجایی‌های برخورد کننده شود. دو حالت پله در خطوط نابجایی ممکن است ایجاد شوند:

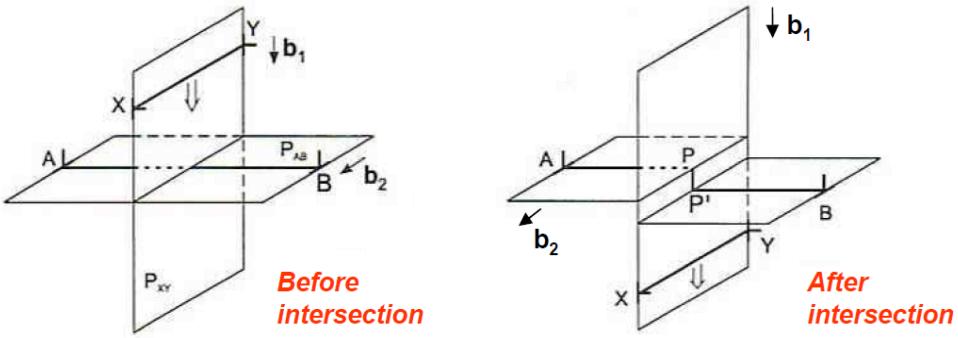
- کینک (Kink) ← اگر پله ایجاد شده در صفحه لغزش نابجایی باشد.

- جاگ (Jog) ← اگر پله ایجاد شده در صفحه لغزش نباشد.



بررسی حالات ساده برخورد نابجایی‌ها:

حالت اول: برخورد دو نابجایی لبه‌ای با بردار برگرزهای عمود بر هم که در دو صفحه لغزش متعامد قرار دارند.

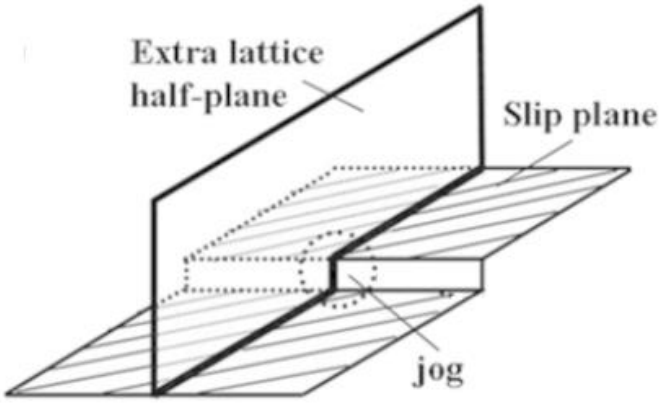


مطابق شکل نتیجه برخورد ایجاد یک جاگ روی خط نابجایی AB است.

نکته: برای تعیین اینکه در برخورد دو نابجایی، کدام در دیگری ایجاد پله می‌کند باید گفت هنگامی نابجایی (۱) باعث ایجاد پله در نابجایی (۲) می‌شود که بردار برگرز نابجایی (۱) عمود بر خط نابجایی (۲) باشد. جهت پله ایجاد شده موازی با بردار برگرز نابجایی (۱) و طول آن برابر با طول بردار برگرز نابجایی (۱) است.

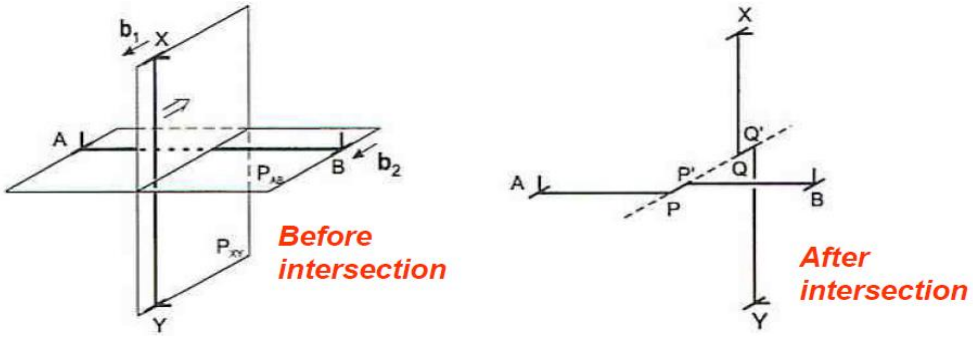
نکته: جهت جاگ ایجاد شده در حالت برخورد بالا، موازی با بردار برگرز نابجایی برخورد کننده (b_1) است. اما از آنجا که این پله روی نابجایی AB قرار دارد، بردار برگرز پله همان b_2 است.

مشاهده می‌شود که جاگ ایجاد شده در برخورد دو نابجایی بالا ماهیت لبه‌ای داشته و بنابراین می‌تواند همراه بقیه نابجایی لغزش کند. تنها تفاوت آن با نابجایی بدون پله این است که به جای لغزش در یک صفحه واحد باید در دو صفحه لغزش کند.



نکته: جاگ ها در نابجایی‌های لبه‌ای، مشکلی در حرکت نابجایی ایجاد نمی‌کنند.

حالت دوم: تلاقی دو نابجایی لبه‌ای با بردار برگرزهای موازی که در دو صفحه لغزش متعامد قرار دارند.

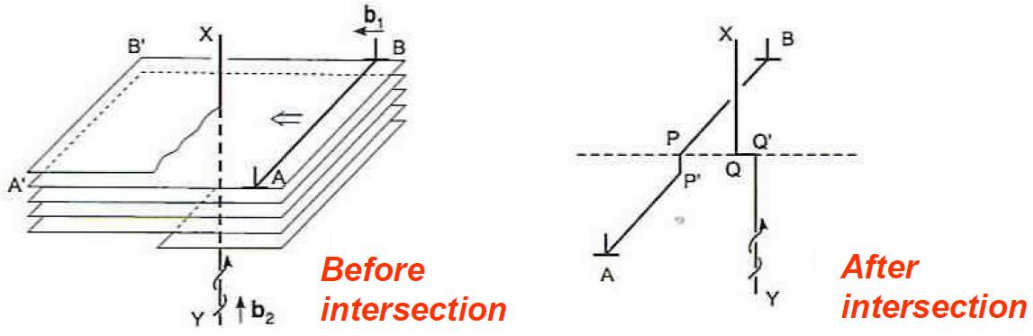


حاصل برخورد ایجاد دو کینک در دو نابجایی است که ماهیت پیچی دارند. زیرا $PP' \parallel b_2$ و $QQ' \parallel b_1$

این کینک‌ها روی نابجایی‌ها ناپایدارند و در حین لغزش می‌توانند حذف شوند.

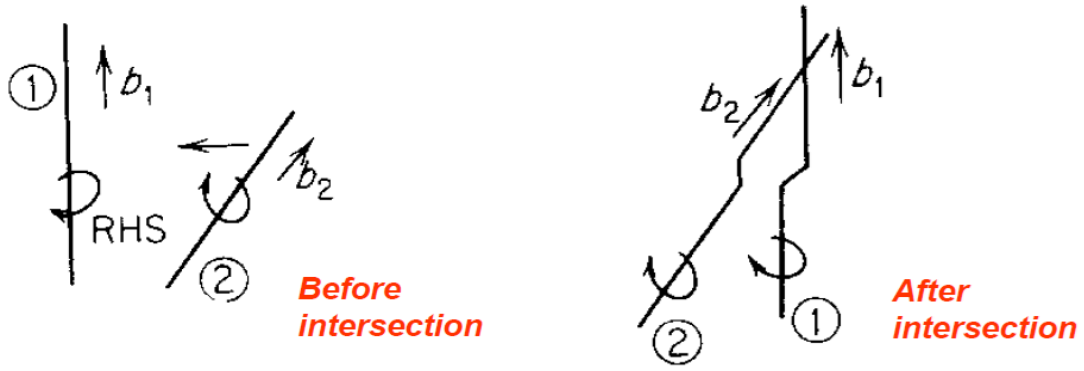
حالت سوم: برخورد یک نابجایی لبه‌ای و یک نابجایی پیچی با خطوط و بردار برگرزهای عمود بر هم

نتیجه برخورد ایجاد یک جاگ لبه‌ای روی نابجایی لبه‌ای و یک جاگ لبه‌ای روی نابجایی پیچی است.

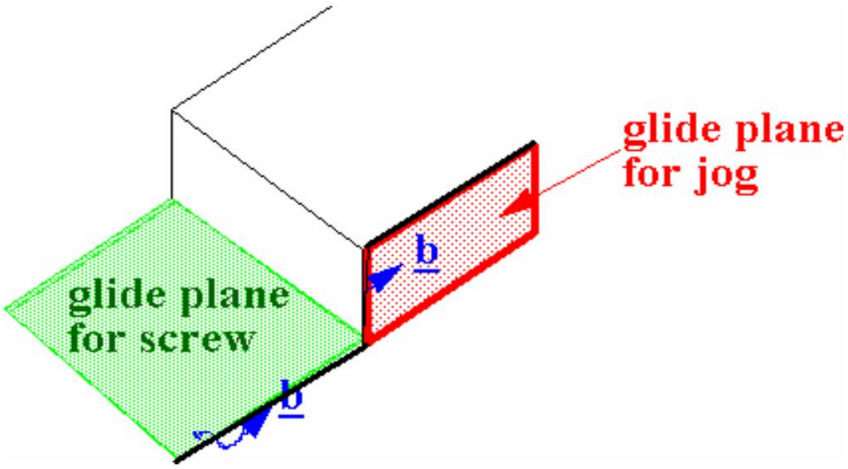


حالت چهارم: برخورد دو نابجایی پیچی با خطوط و بردار برگرزهای عمود بر هم

نتیجه برخورد ایجاد دو جاگ لبه‌ای روی هر دو نابجایی پیچی است.



جاگ‌های ایجاد شده روی نابجایی‌های پیچی (حالت چهارم) برعکس جاگ‌های روی نابجایی‌های لبه‌ای (حالت اول) به راحتی به همراه نابجایی حرکت نمی‌کنند. زیرا جاگ‌های لبه‌ای ایجاد شده روی نابجایی پیچی، تنها روی صفحه تشکیل شده از بردار برگرز و خط نابجایی‌شان حرکت می‌کنند. بنابراین مطابق شکل، تحرک نابجایی اصلی را می‌گیرند.

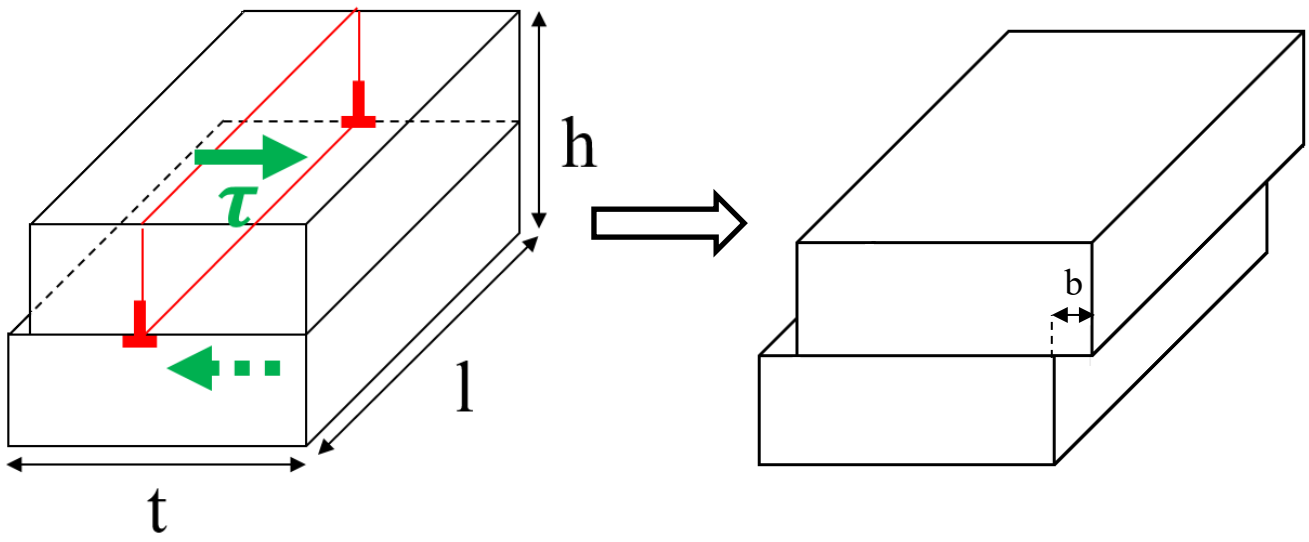


این نوع جاگ‌ها از اهمیت زیادی برخوردارند، زیرا باعث کاهش تحرک نابجایی‌ها می‌شوند.

Sessile Jog ← جاگ ساکن

Glissile Jog ← جاگ متحرک

نیروی اعمال شده روی یک خط نابجایی در اثر اعمال تنش برشی خارجی:



برای محاسبه مقدار کار انجام شده در فرایند لغزش نابجایی بالا می‌توان از دو طریق عمل کرد:

روش اول:

$$w_1 = (\tau \cdot l \cdot t) \cdot b$$

روش دوم: فرض می‌کنیم در اثر اعمال تنش برشی، نیرویی بر خط نابجایی اعمال می‌شود (F) که این نیرو باعث می‌شود خط نابجایی از نقطه a به c برسد. در این صورت کار انجام شده برابر است با:

$$w_2 = F \cdot t$$

اگر f را برابر با نیروی اعمال شده بر واحد طول خط نابجایی در نظر بگیریم، خواهیم داشت:

$$w_2 = f \cdot l \cdot t$$

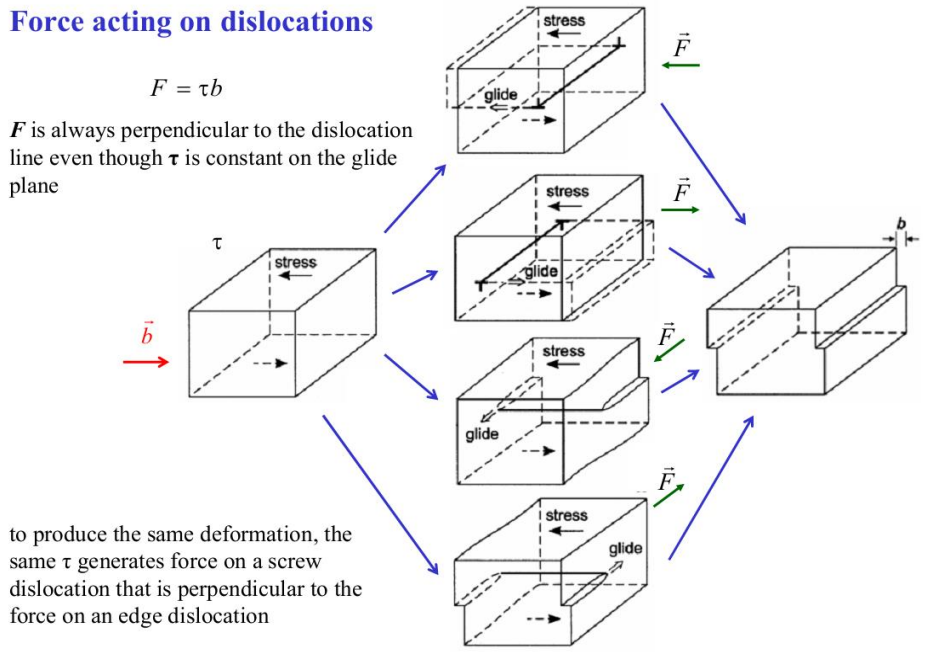
کارهای محاسبه شده از هر دو روش برابر هستند:

$$w_1 = w_2$$
$$\tau \cdot l \cdot t \cdot b = f \cdot l \cdot t$$
$$f = \tau \cdot b$$

این نیرو بر تمام نقاط خط نابجایی عمود و جهت آن به سمت قسمت لغزش نکرده است.

چون بردار برگرز برای هر خط نابجایی خمیده، ثابت است اگر τ ثابت باشد، f نیز مقداری ثابت دارد اما جهت آن همیشه عمود بر خط نابجایی است.

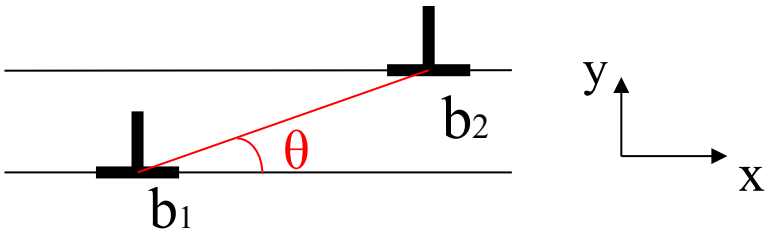
پس نیروی وارد بر خط نابجایی لزوماً هم جهت با تنش وارد شده خارجی نیست.



نیروهای بین نابجایی‌ها:

۱. نابجایی‌های لبه‌ای

برای مشخص کردن نیروی بین نابجایی‌ها، حالت ساده زیر را در نظر می‌گیریم، یعنی محاسبه نیروی بین دو نابجایی لبه‌ای موازی واقع در دو صفحه لغزش موازی:



$$F_r = \frac{Gb_1b_2}{2\pi(1-\vartheta)}\frac{1}{r} \qquad F_\theta = \frac{Gb_1b_2}{2\pi(1-\vartheta)}\frac{\sin 2\theta}{r}$$

چون حرکت نابجایی های لبه‌ای محدود به صفحه لغزش آنها است، مؤلفه نیرو در امتداد جهت لغزش و در صفحه لغزش (F_x) مهم است.

F_x از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$F_x = F_r\cos\theta - F_\theta\sin\theta = \frac{Gb_1b_2x(x^2-y^2)}{2\pi(1-\vartheta)(x^2+y^2)^2}$$

اگر نیرو در جهت مثبت محور x باشد: $F_x > 0$

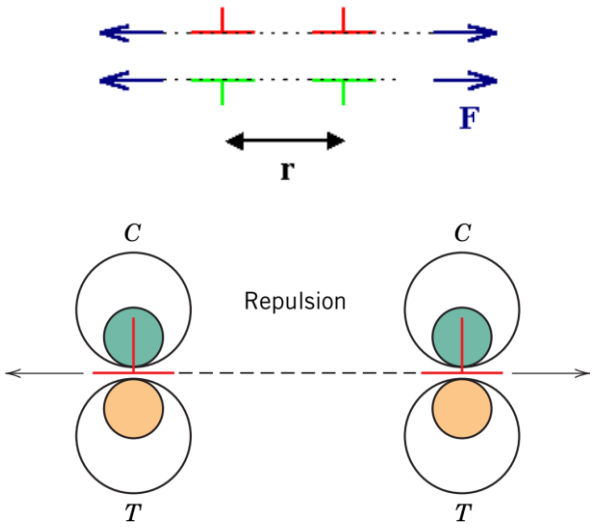
اگر نیرو در جهت منفی محور x باشد: $F_x < 0$

اکنون به بررسی حالت‌های مختلف زیر می‌پردازیم:

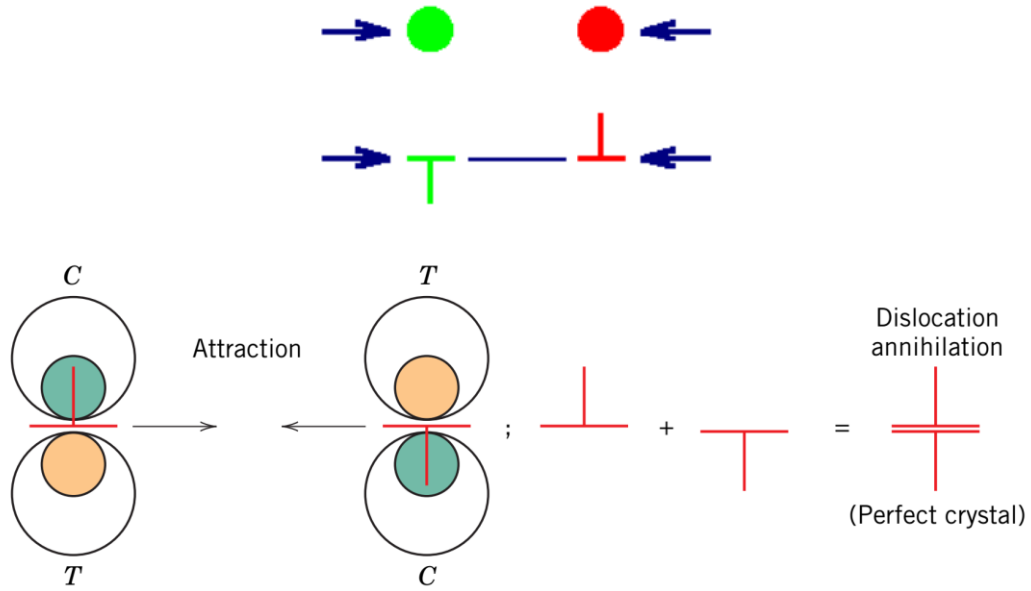
حالت اول: دو نابجایی در یک صفحه لغزش قرار داشته باشند. در این شرایط $y = 0$ یا $\theta = 0$ و دافعه یا جاذبه بودن نیرو بستگی به هم علامت یا غیرهم علامت بودن نابجایی ها دارد.

$$F_x = \frac{G b_1 b_2}{2\pi(1-\vartheta)} \frac{1}{x}$$

- اگر دو نابجایی هم علامت ← b_1 و b_2 هم علامت (هر دو مثبت یا هر دو منفی) ← دو نابجایی همدیگر را دفع می کنند.



- اگر دو نابجایی غیرهم‌علامت ← b_1 و b_2 غیرهم‌علامت (یکی مثبت و دیگری منفی) ← دو نابجایی همدیگر را جذب می‌کنند.

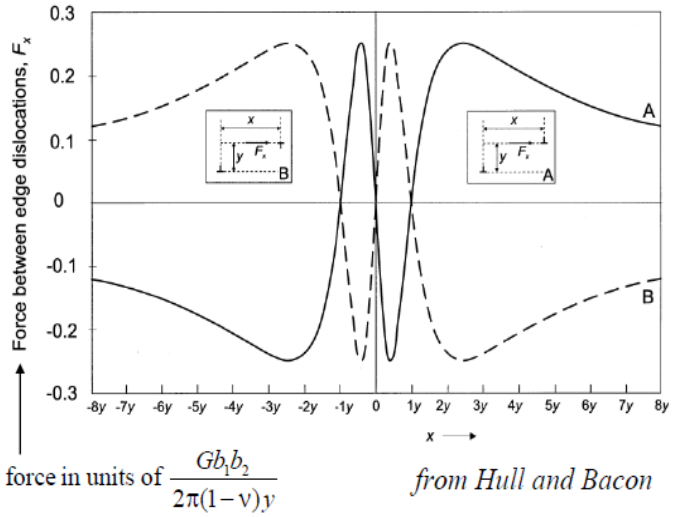


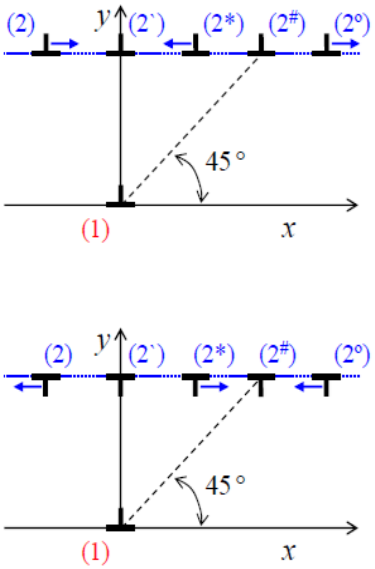
حالت دوم: دو نابجایی در یک صفحه لغزش نباشند. یعنی $y \neq 0$ یا $\theta \neq 0$. در این حالت مقدار و علامت نیرو هم به علامت نابجایی‌ها و هم اندازه نسبی x و y بستگی دارد. شکل زیر تغییرات نیرو را برای نابجایی‌های هم‌علامت و غیرهم‌علامت نشان می‌دهد:

$$F_x = \frac{Gb_1b_2x(x^2 - y^2)}{2\pi(1-\vartheta)(x^2+y^2)^2}$$

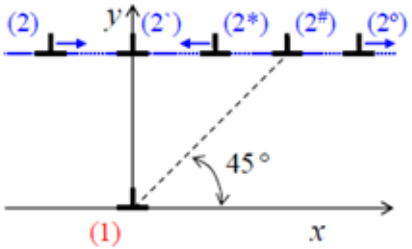
Forces between dislocations

Example: interaction between two parallel straight edge dislocations





- برای نابجایی‌های هم‌علامت:

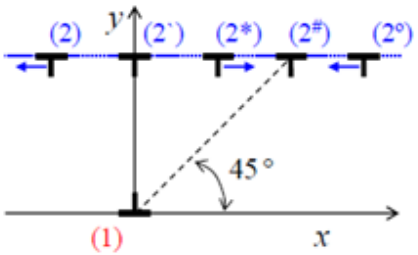


نیرو از نوع دافعه است $\quad if\ |x| > |y|\ (\theta < 45°) \implies$

نیرو از نوع جاذبه است $\quad if\ \ |x| < |y| (\theta > 45°) \implies$

$$if\ \ x = 0(\theta = 90°) \quad or \quad x = y\ (\theta = 45°) \implies \quad F_x = 0$$

- برای نابجایی‌های غیرهم‌علامت:



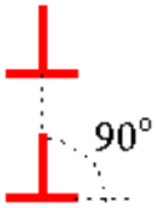
نیرو از نوع جاذبه است $if\ |x| > |y|\ (\theta < 45°) \implies$

نیرو از نوع دافعه است $if\ \ |x| < |y| (\theta > 45°) \implies$

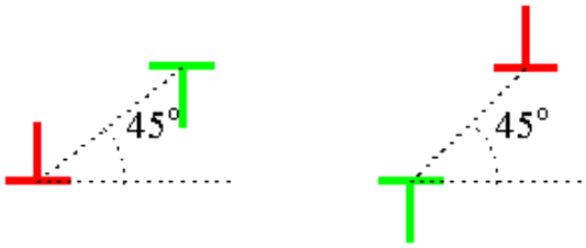
$$if\ \ x = 0(\theta = 90°) \quad or \quad x = y\ (\theta = 45°) \implies \quad F_x = 0$$

با تجزیه و تحلیل منحنی‌ها می‌توان نتیجه گرفت:

- در شرایطی که نابجایی ها هم علامت باشند، نقطه تعادل پایدار $x = 0(\theta = 90°)$ است:



در شرایطی که نابجایی ها غیرهم علامت باشند، نقطه تعادل پایدار $x = y\ (\theta = 45°)$ است:



۲. نابجایی‌های پیچی

از آنجا که میدان تنشی یک نابجایی پیچی، تقارن شعاعی دارد، نیروی بین نابجایی‌ها یک نیروی شعاعی است که تنها به فاصله دو نابجایی، r، بستگی دارد:

$$F_r = \tau_{\theta z} b = \frac{Gb^2}{2\pi r}$$

برای نابجایی‌های هم‌علامت، نیرو از نوع دافعه و برای نابجایی‌های غیرهم‌علامت، نیرو از نوع جاذبه است.

نابجایی‌های غیرهم‌علامت درون یک صفحه با جذب همدیگر، مشابه نابجایی‌های لبه‌ای باعث حذف همدیگر می‌شوند.

منابع تولید و تکثیر نابجایی‌ها (Dislocation sources and multiplication of them)

چگالی نابجایی ها در ماده کاملاً آنیل شده: $۱۰^{۴} - ۱۰^{۶}\ mm^{-2}$

چگالی نابجایی ها در ماده شدیداً تغییرشکل یافته: $۱۰^{۸} - ۱۰^{۱۰}\ mm^{-2}$

به جز ویسکرها، همه فلزات پس از انجماد حاوی تعداد زیادی نابجایی هستند. پس تعداد زیادی نابجایی در فرایند انجماد و در حین رشد بلور ایجاد می شود. این نابجایی ها در اثر جهت گیری های متفاوت و گرادیان دمایی و ترکیبی بین بازوهای دندریتی مجاور در شبکه یا مرزدانه ها ایجاد می شوند.

از طرفی مشاهده می شود که با اعمال و افزایش تغییرشکل پلاستیک، چگالی نابجایی شدیداً افزایش می یابد. این کار فقط از طریق وجود منابع تولید و تکثیر نابجایی‌ها در اثر تغییرشکل پلاستیکی فلز امکان‌پذیر است.

مشخص شده است که یکی از منابع تولید نابجایی در مراحل اول تغییرشکل، مرزدانه ها هستند. در حقیقت، نابجایی‌ها از پله‌ها و لبه‌های موجود در مرزدانه تشکیل و به داخل بلور حرکت می‌کنند.

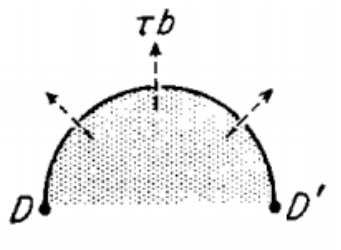
منابع دیگر تولید نابجایی ها، تجمع جای خالی ها، جوانه زنی ناهمگن نابجایی ها در محل ناخالصی ها تحت تنش های موضعی زیاد و تشکیل نابجایی در اثر تغییر فازی است.

منبع فرانک-رید (Frank-Read source)

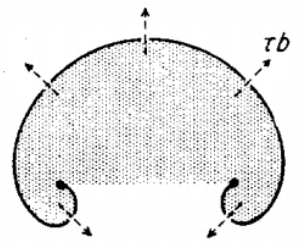
نحوه عملکرد منبع فرانک-رید را می‌توان در اشکال زیر مشاهده کرد:

خط نابجایی DD' را در صفحه لغزش خود تصور کنید، به طوری که خط نابجایی در نقاط D و D' از صفحه لغزش خارج شده و یا در این نقاط به وسیله موانعی قفل می‌شود.

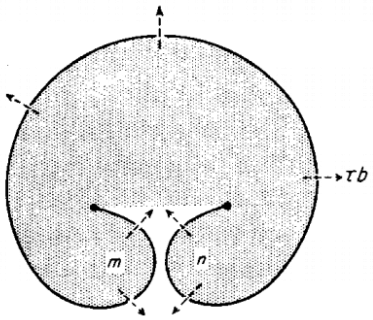
اعمال تنش برشی τ باعث خم شدن خط نابجایی DD' می شود.



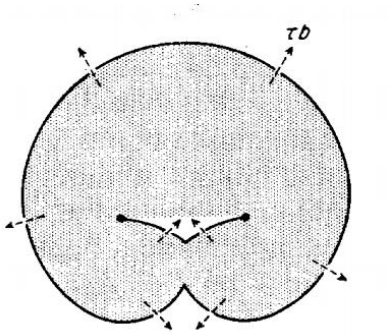
اگر تنش به اندازه‌ای بزرگ شود که خمش را از حد نیم دایره بگذراند، شکل خط نابجایی به صورت زیر می‌شود:



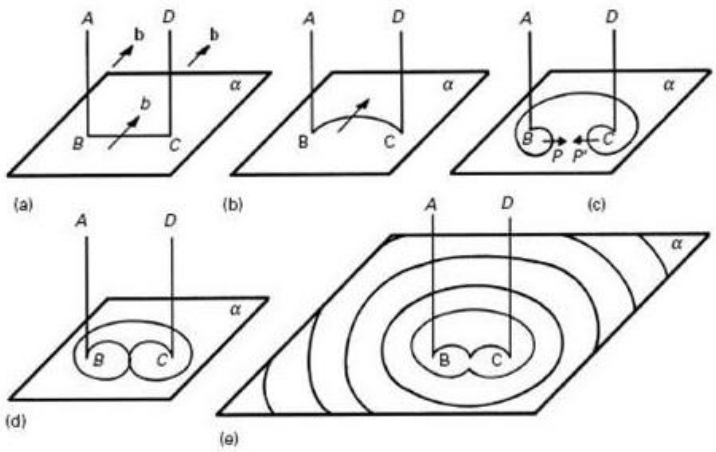
در نقطه های m و n نابجایی‌های مثبت و منفی به هم رسیده و همدیگر را از بین می‌برند و ارتباط دو قسمت خط نابجایی قطع می‌شود.



در نهایت ایجاد یک نابجایی حلقه‌ای جدید و برگشت خط DD' را به مرحله اول داریم.

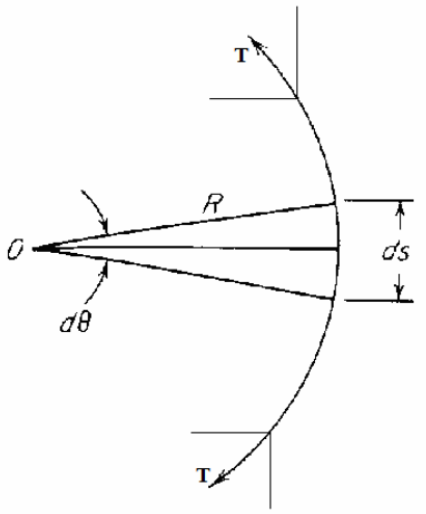


برای تولید حلقه‌های نابجایی دیگر مراحل بالا می‌تواند بارها تکرار شود.



محاسبه تنش برشی برای فعال کردن یک منبع فرانک-رید:

خط نابجایی منحنی در شکل زیر را تصور کنید.



کشش خطی (T) تمایل به مستقیم کردن خط و تنش برشی اعمال شده سعی در منحنی کردن آن دارد.

می‌خواهیم مقدار تنش برشی τ لازم برای حفظ شعاع انحنای R در نابجایی را حساب کنیم:

نیروی اعمال شده به نابجایی به وسیله تنش خارجی در طول ds: $F = f \times l = \tau \times b \times dS$

نیروی کشش خطی نابجایی: $2T\sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) \approx 2T\left(\frac{d\theta}{2}\right) = Td\theta$

در هر میزان تنش، تعادل این دو نیرو است که انحنای خط نابجایی را تعیین می‌کند. برای محاسبه در حالت تعادل استاتیکی می‌توان گفت:

$$\sum F_x = 0 \quad \Longrightarrow \quad T.d\theta = \tau.b.dS \qquad ,d\theta = \frac{dS}{R}$$

$$\Longrightarrow \tau = \frac{T}{bR}$$

گفتیم که مقدار T یا تلاش خط نابجایی برای مستقیم شدن برابر با Gb^2 است:

$$\Longrightarrow \tau = \frac{Gb}{R}$$

حداکثر تنش برشی لازم برای افزایش انحنا هنگامی است که نابجایی به صورت نیم دایره درآمده و R حداقل مقدار را دارد، یعنی $R = \frac{L}{2}$ که L طول خط نابجایی مستقیم است.

$$\boldsymbol{\tau_c = \frac{2Gb}{L}}$$

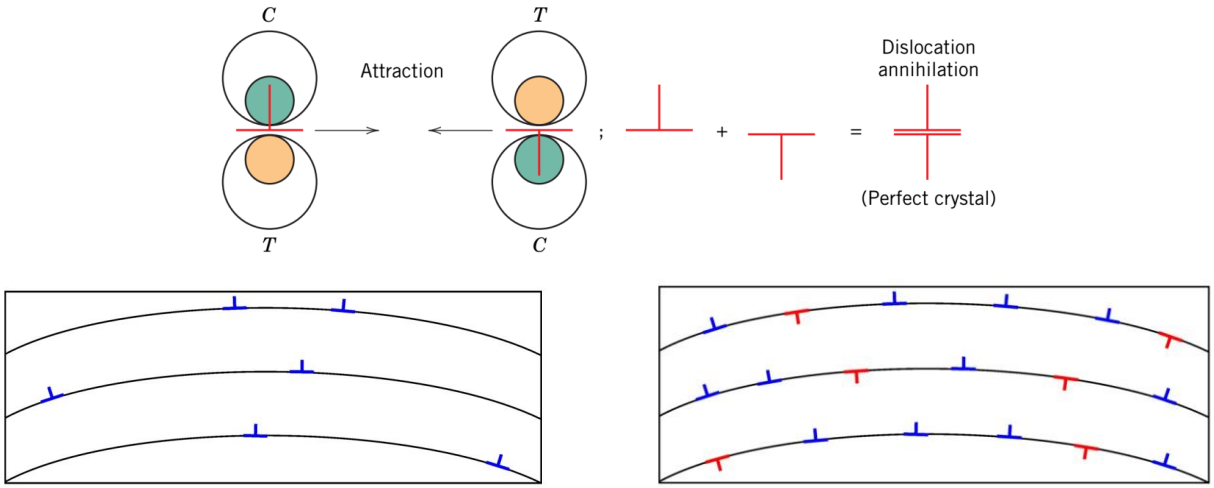
در حالت قبل و بعد از این حالت، مقدار شعاع بزرگ‌تر است. پس اگر بتوانیم نیم دایره را ایجاد کنیم، خمش‌های قبل و بعد را هم می‌توان ایجاد کرد و اگر $\tau \geq \tau_c$ دیگر شکل نابجایی پایدار نیست و می‌تواند منجر به تولید نابجایی‌های دیگر شود.

فرایند حذف و آرایش مجدد نابجایی ها (Dislocation annihilation and rearrangement)

نیروی بین نابجایی ها به قدری است که در دماهای بالا روی حرکت آنها تأثیر می‌گذارد.

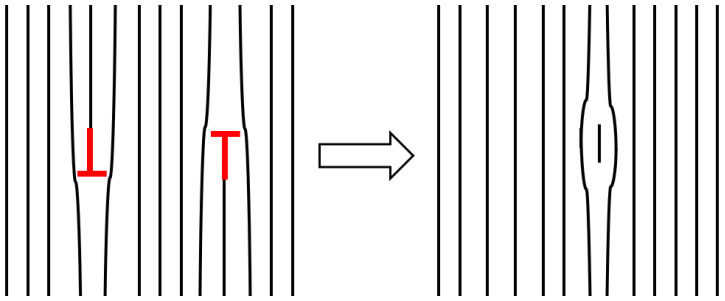
در حقیقت افزایش دما، تنش اصطکاکی شبکه را کاهش داده ولی بر نیروی بین نابجایی‌ها تأثیر زیادی ندارد.

اولین اثر مهم این پدیده آن است که در دماهای بالا، بسیاری از نابجایی‌های غیرهم‌علامت همدیگر را جذب کرده و حذف می‌شوند و در نتیجه دانسیته نابجایی‌ها کم می‌شود.

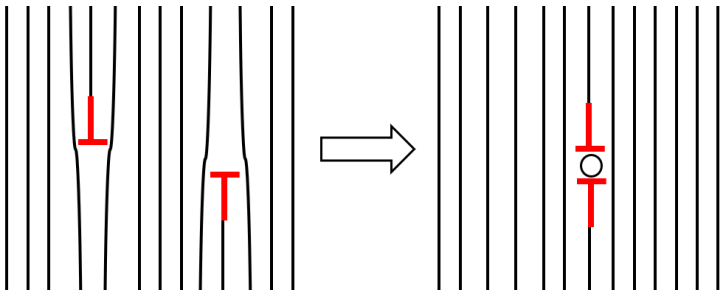


اگر دو نابجایی روی یک صفحه لغزش نباشند و روی دو صفحه لغزش نزدیک به هم باشند، یکی از حالات زیر پیش می‌آید:

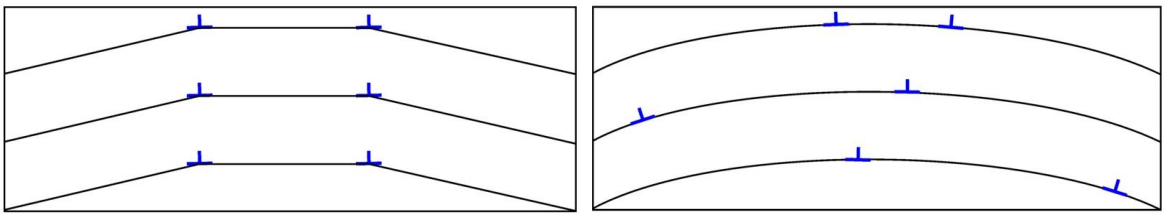
- پس از جذب دو نابجایی و رسیدن آنها به هم، ردیفی از اتم‌های بین‌نشین در اطراف آنها ایجاد می‌شود.



- پس از رسیدن دو نابجایی به هم، ردیفی از جای‌خالی‌ها ایجاد می‌شود که می‌توان آنها را با نفوذ از بین برد.



اثر دوم افزایش دما، آرایش نابجایی‌های هم‌علامت به ترتیبی است که میدان‌های تنشی همدیگر را خنثی کرده و انرژی کل شبکه به حداقل برسد.



تجمع نابجایی‌ها (Dislocation pile-up)

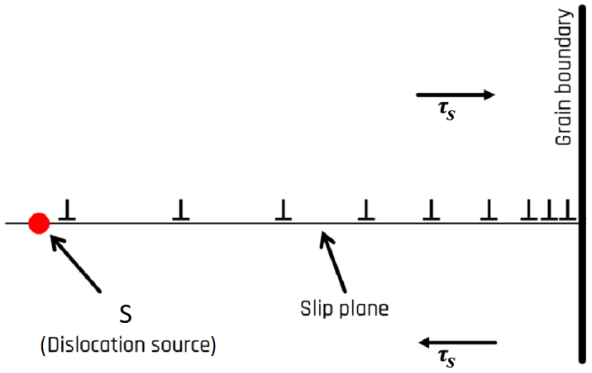
غالباً نابجایی‌های تولید شده از یک منبع فرانک-رید یا منابع دیگر که روی یک صفحه لغزش قرار دارند در اثر برخورد با موانع از قبیل مرزدانه‌ها، مرزهای بین فازی، نابجایی‌های غیرمتحرک و ناخالصی‌ها متوقف شده و پشت سر هم جمع می‌شوند. این حالت را تجمع نابجایی‌ها گویند.

با مشاهده این پدیده دو سؤال مطرح می‌شود:

سوال اول: اینکه میزان تنش اعمال شده از طرف نابجایی سر صف به مانع چقدر است؟

مشخص شده است که تنش برشی اعمال شده از طرف نابجایی سر صف به مانع برابر است با:

$$\tau_f = n\tau_s$$



τ_f: تنش برشی اعمال شده روی نابجایی سر صف

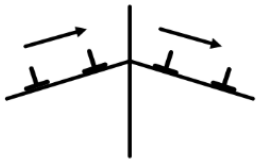
τ_s: تنش برشی تفکیک شده میانگین در صفحه لغزش

n: تعداد نابجایی موجود در صف

مشاهده می‌شود که در این شرایط با یک تمرکز تنش روبرو هستیم.

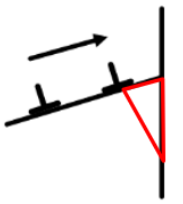
اکنون بعضی اثرات این تمرکز تنش را بررسی می‌کنیم:

۱- اگر τ_f به حد معینی (تنش برشی تئوری بلور) برسد می‌تواند باعث تسلیم در طرف دیگر مانع شود.



GB

۲- اگر مانع در برابر تغییرشکل پلاستیکی مقاومت کند، در محل مرز با مانع، حفره و ترک ایجاد می‌شود.



سوال دوم: اینکه نهایتاً در این شرایط چه تعدادی نابجایی بین مانع و منبع، تولید خواهد شد؟

این تعداد توسط محققینی به نام‌های فرانک و نابارو و اشلبی (Eshelby) مشخص شد:

$$n = \frac{k\pi\tau_s l}{Gb}$$

k: ثابت

τ_s: تنش برشی تفکیک شده میانگین در صفحه لغزش

l: فاصله بین مانع و منبع نابجایی‌ها (S در شکل)

b: بردار برگرز

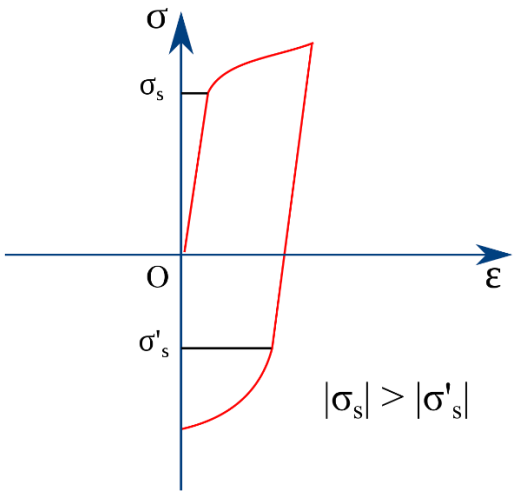
G: مدول برشی

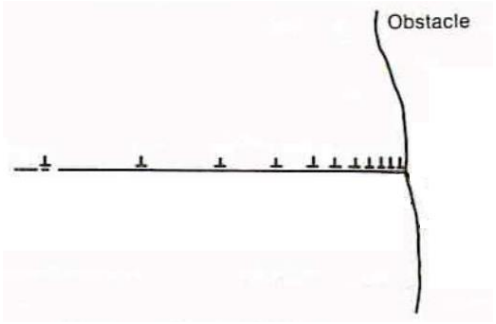
n: تعداد نابجایی‌ها

وقتی مانع نابجایی مرزدانه باشد، فاصله بین مانع و منبع (L) را برابر با شعاع دانه $\frac{D}{۲}$ (D: اندازه دانه) می‌گیرند:

$$n = \frac{k\pi\tau_s D}{4Gb}$$

اثر باوشینگر (Bauschinger effect)



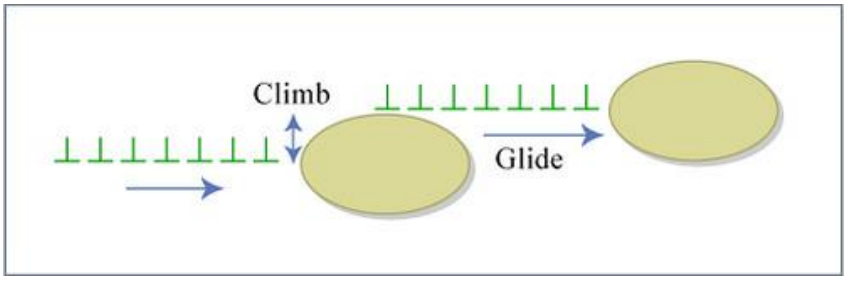


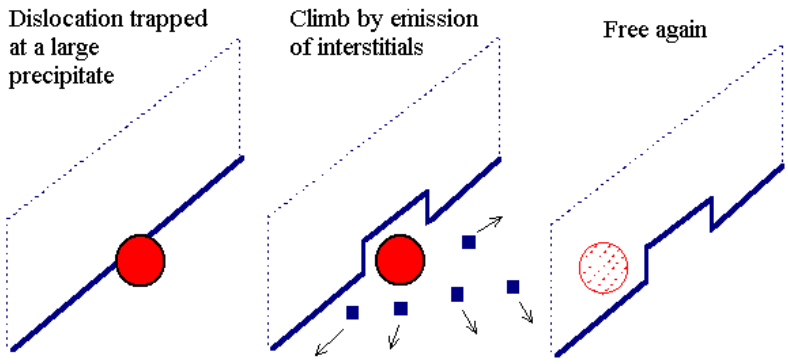
مکانیزم های عبور نابجایی‌ها از موانع:

۱- صعود (Climb):

مخصوص نابجایی لبه‌ای است.

نابجایی لبه‌ای پس از برخورد با مانع در صفحه لغزشی خود می‌تواند با انجام عمل صعود تحت شرایطی به صفحه بالا یا پایین و موازی با صفحه لغزش اولیه منتقل شود. این عمل به وسیله نفوذ اتمی انجام می‌شود و سپس به لغزش خود ادامه دهد.

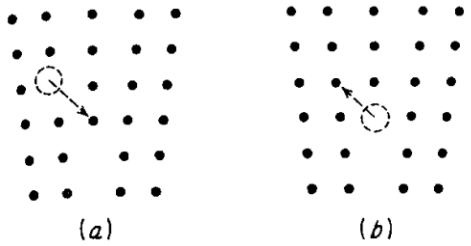




عوامل لازم برای انجام صعود:

عمل صعود یک فرایند نیازمند نفوذ اتمی است. بنابراین وقوع آن هم به زمان نیاز دارد و هم به دمای بالا. همچنین برای انجام یک عمل صعود نیاز به جای خالی است.

افزایش دما هم باعث تسریع در نفوذ و هم افزایش تعداد جای خالی‌ها می‌شود.

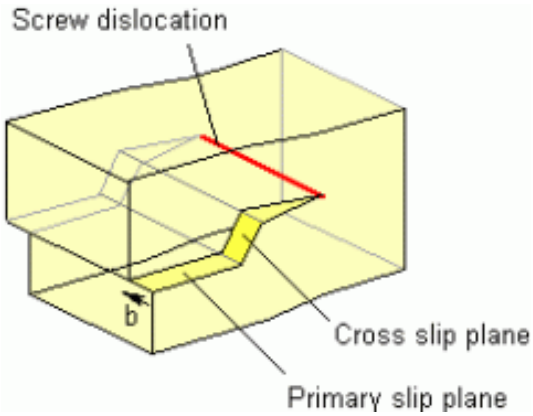


(*a*) Diffusion of vacancy to edge dislocation; (*b*) dislocation climbs up one lattice spacing.

۲- لغزش متقاطع (Cross Slip) :

مخصوص نابجایی‌های پیچی است.

نابجایی پیچی در اثر برخورد با موانعی واقع در صفحه لغزش خود (صفحه لغزش آسان) می‌تواند با تغییر صفحه لغزش، از مانع گذشته و پس از گذر از مانع مجدداً روی صفحه لغزش آسان خود قرار گیرد و به حرکت ادامه دهد.

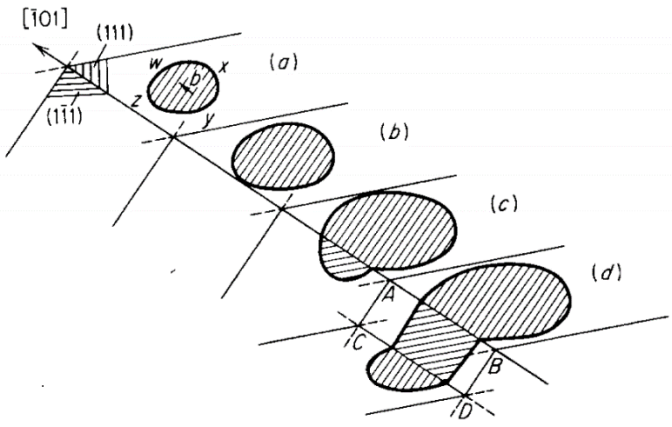


همان‌طور که قبلاً بیان شد، به دلیل موازی بودن بردار برگرز و خط نابجایی پیچی، این نوع نابجایی می‌تواند در صفحات مختلفی لغزش کند و حرکت آن مانند نابجایی لبه‌ای محدود به یک صفحه لغزش خاص نیست.

صفحات موازی با صفحه لغزش اولیه نابجایی پیچی، تنش برشی یکسانی برای لغزش نیاز دارند.

لازمه لغزش متقاطع ← بالا رفتن تنش

لغزش متقاطع مانند صعود به افزایش دما نیاز ندارد و برعکس صعود، در دماهای پایین نیز اتفاق می‌افتد.



Cross slip in a face-centered cubic crystal. *(From D. Hull, "Introduction to Dislocations," p. 56, Pergamon Press, New York, 1965. By permission of the publishers.)*

نابجایی های ناقص یا نابجایی‌های جزئی (Imperfect or partial dislocations)

تعاریف

نابجایی واحد یا نابجایی با استحکام واحد (Unit dislocation or dislocation of unit strength):

نابجایی با بردار برگرز برابر با یک فاصله اتمی شبکه بلوری (یک بردار انتقال). این فاصله می تواند در جهات بلوری مختلف باشد.

نابجایی کامل (Perfect dislocation):

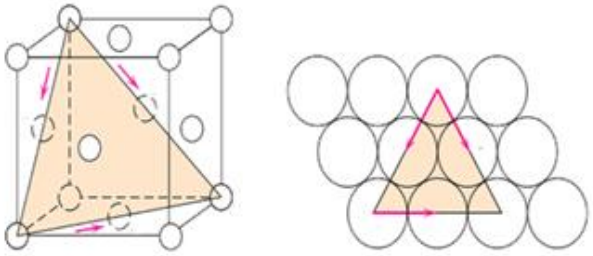
نابجایی با بردار برگرز برابر با یک فاصله اتمی (یک بردار انتقال) در راستای فشرده ترین جهت بلور

نابجایی ناقص (Imperfect dislocation):

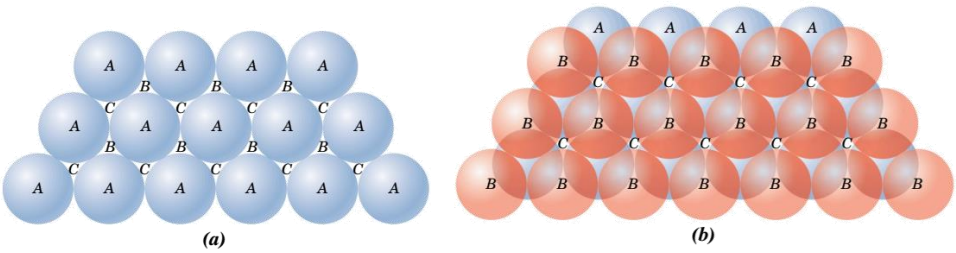
نابجایی که اندازه بردار برگرز آن کوچک‌تر از یک فاصله اتمی (یک بردار انتقال) در شبکه بلوری باشد.

بررسی نابجایی‌های ناقص در شبکه FCC

قبلاً گفته شد که سیستم‌های لغزش در شبکه FCC عبارت‌اند از $\{111\}\langle 110\rangle$ و بردار برگرز نابجایی‌ها (نابجایی‌های کامل) برابر با یک فاصله اتمی در جهات $\langle 110\rangle$ است یعنی: $b = \frac{a}{2}\langle 110\rangle$



از طرفی گفته شد که شبکه FCC را می‌توان از روی هم چیده شدن صفحات $\{111\}$ به ترتیب ABCABC… ایجاد کرد.



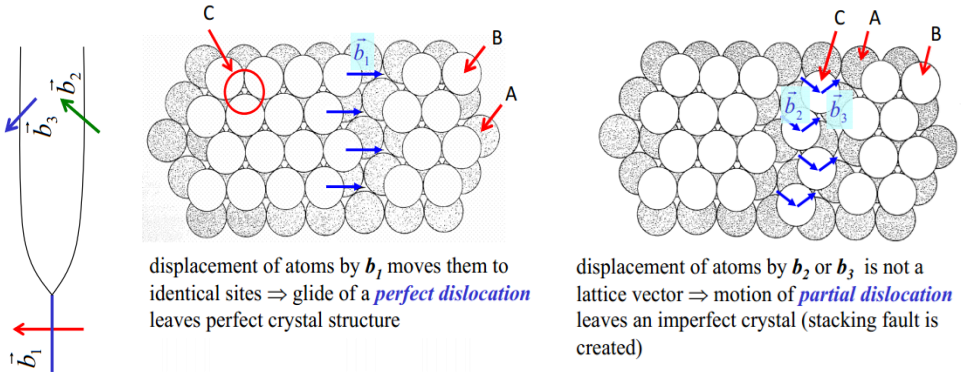
(*a*) A portion of a close-packed plane of atoms; *A*, *B*, and *C* positions are indicated. (*b*) The *AB* stacking sequence for close-packed atomic planes.

مطابق شکل انتقال یک نابجایی کامل به اندازه یک بردار برگرز آن معادل است با جابجای زیر:

$$B \text{ جدید} \rightarrow B \text{ اولیه}$$

جابجایی برشی معادلی را می‌توان در مسیر زیر با انرژی کمتر انجام داد:

$$B \text{ اولیه} \rightarrow C \rightarrow B \text{ جدید}$$



این عمل یعنی تجزیه یک نابجایی کامل به دو نابجایی جزئی به صورت زیر:

$$\vec{b}_1 \rightarrow \vec{b}_2 + \vec{b}_3$$

$$\frac{a}{2}[10\bar{1}] \rightarrow \frac{a}{6}[11\bar{2}] + \frac{a}{6}[2\bar{1}\bar{1}]$$

به نابجایی‌های با بردار برگرز $\vec{b}_2$ و $\vec{b}_3$، **نابجایی های ناقص یا نابجایی های جزئی شاکلی** می‌گویند.

این تجزیه زمانی ممکن است که طبق قانون فرانک منجر به کاهش انرژی شود:

$$b_1^2 > b_2^2 + b_3^2$$

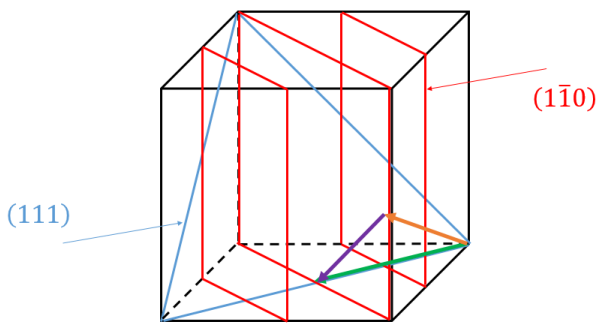
$$\frac{a^2}{4}(1^2+1^2) > 2 \times \frac{a^2}{36}(1^2+1^2+2^2) \implies \frac{a^2}{2} > \frac{a^2}{3}$$

در شبکه‌های FCC عملاً نابجایی‌های کامل جهت کاهش انرژی تبدیل به نابجایی ناقص می‌شوند.

نمایش چگونگی تجزیه یک نابجایی کامل به دو نابجایی جزئی:

می توان تصور کرد که شبکه FCC از روی هم چیده شدن صفحات $\{110\}$ با ترتیب ababab… تشکیل می‌شود.

مطابق شکل برای ایجاد یک نابجایی کامل در این زاویه لازم است دو نیم صفحه از نوع $(1\bar{1}0)$ به وجود آید که در حقیقت همان نابجایی‌های جزئی هستند:

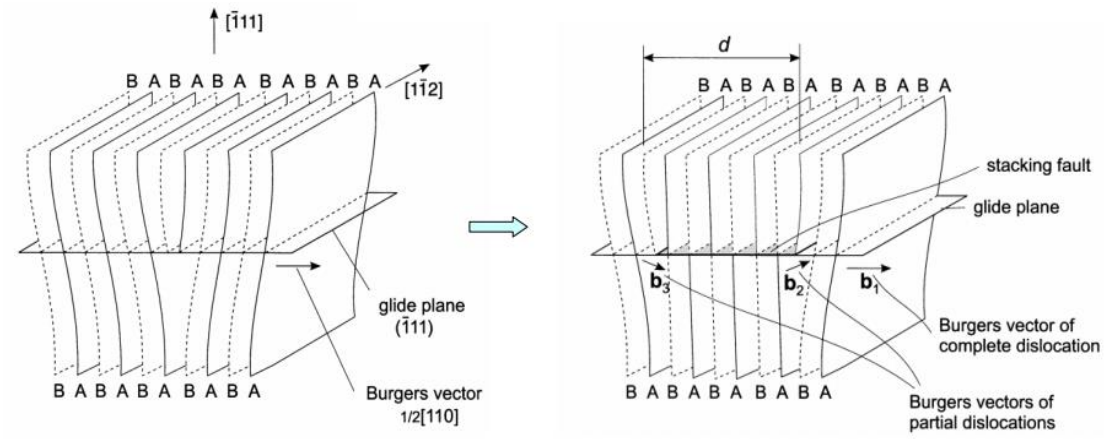


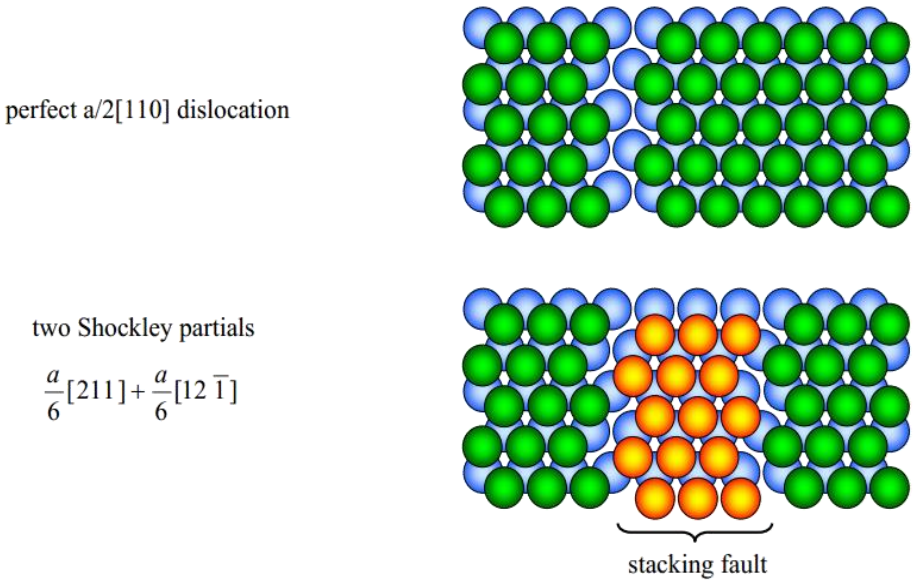
$$\vec{b}_1 \rightarrow \vec{b}_2 + \vec{b}_3$$

$$\frac{a}{2}[1\bar{1}0] \rightarrow \frac{a}{6}[1\bar{2}1] + \frac{a}{6}[2\bar{1}\bar{1}]$$

نیروی بین دو نابجایی جزئی از نوع دافعه است و این سبب دور شدن آنها از هم می‌شود (زاویه بین بردار برگرزهای دو نابجایی ۶۰ درجه است).

ملاحظه می شود که در اثر جدا شدن دو نابجایی جزئی در بین آنها نقص در چیده شدن ایجاد می‌شود.



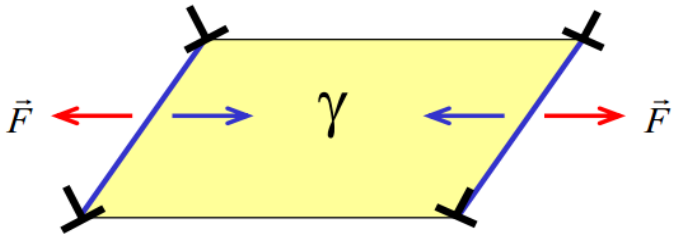


در نتیجه می توان گفت در اثر تجزیه یک نابجایی کامل به دو نابجایی جزئی، نتایج زیر حاصل می شود:

۱- در نتیجه تجزیه، انرژی خط نابجایی کاهش می یابد.

۲- در نتیجه ایجاد قسمت نقص در چیده شدن، انرژی آزاد سیستم افزایش می یابد. (تغییر نظم در چیدمان صفحات)

بنابراین در اثر این دو نتیجه متناقض و عکس یکدیگر، در هر شبکه متناسب با خواص ذاتی آن شبکه، دو نابجایی جزئی در یک فاصله معین از همدیگر قرار خواهند گرفت.



فاصله دو نابجایی جزئی از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$d = \frac{Gb_2b_3}{2\pi(1-\vartheta)\gamma}$$

d: فاصله تعادلی بین دو نابجایی ناقص

G: مدول برشی

b_2 و b_3: بردارهای برگرز دو نابجایی ناقص

γ: انرژی نقص در چیده شدن (Stacking fault energy)

با استفاده از این رابطه می‌توان دید که:

$$\gamma_{Al} \approx 200\ {}^{erg}/_{cm^2} \implies d \approx b$$

$$\gamma_{Cu} \approx 40\ {}^{erg}/_{cm^2} \implies d \approx 12b$$

به طور خلاصه می‌توان نتیجه گرفت در شبکه‌های FCC، نابجایی‌های کامل به دو نابجایی ناقص که بین آنها یک ناحیه نقص در چیده شدن وجود دارد تجزیه می‌شوند. یعنی نابجایی‌ها به صورت روبان‌های نقص در چیده شدن مشاهده می‌شوند.

بررسی اثرات تجزیه نابجایی های کامل در شبکه FCC:

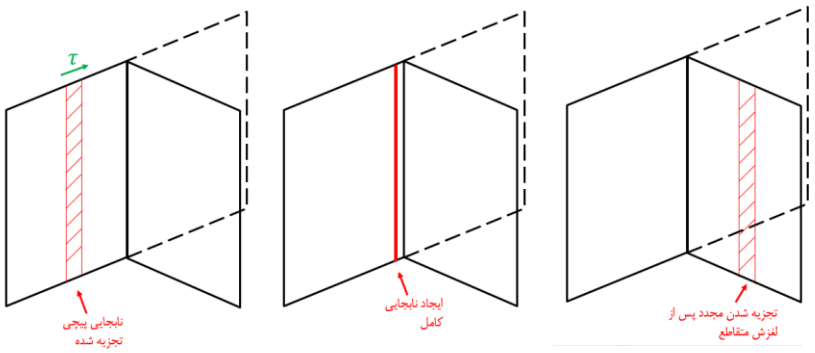
الف) چگونگی لغزش متقاطع در شبکه های FCC:

در شبکه های FCC کلیه نابجایی ها از جمله نابجایی پیچی مشمول تجزیه می شود.

نابجایی پیچی پس از تجزیه شدن محدود به صفحه لغزش خود می‌شود. تنها راهی که نابجایی پیچی برای انجام لغزش متقاطع دارد این است که دو نابجایی ناقص در محل تلاقی دو صفحه به یکدیگر بپیوندند و مجدداً تشکیل نابجایی پیچی کامل دهند. در این شرایط، نابجایی پیچی می‌تواند با انجام عمل لغزش متقاطع از مانع گذشته و در صفحه جدید مجدداً تجزیه شود.

مراحل لغزش متقاطع در این وضعیت:

از این فرایند نتیجه می شود که هر چه عرض باند نقص بیشتر باشد، عمل لغزش متقاطع سخت تر انجام می شود. یعنی این عمل در مس که در آن $d \approx 12b$ سخت تر از آلومینیم است که در آن $d \approx b$.



ب) تشکیل موانع لومر-کاترل (Lomer-Cottrell Barrier)

دو نابجایی جزئی روی دو صفحه {۱۱۱} همدیگر را جذب کرده (نیروی بین آنها جاذبه است) و با هم برخورد کرده و ترکیب می شوند تا نابجایی با انرژی کمتر ایجاد کنند.

$$\frac{a}{6}[\bar{1}21] + \frac{a}{6}[2\bar{1}\bar{1}] \rightarrow \frac{a}{6}[110]$$

نابجایی ایجاد شده در اثر این ترکیب در صفحه (001) واقع می‌شود.

از آنجا که نابجایی ایجاد شده در اثر ترکیب، یک نابجایی ناقص در صفحه‌ای است که صفحه لغزش شبکه FCC نیست، در نتیجه یک نابجایی ساکن است که می‌تواند مانعی برای حرکت نابجایی‌های دیگر باشد.

در دماهای بالا و تحت تنش‌های زیاد می توان بر این مانع غلبه کرد.