عناوین درسی:

۱ـ مقدمه 2ـ عیوب بلوری 3ـ مکانیزم های مقاوم شدن

4ـ شکست، خستگی، خزش (توجیه توسط عیوب بلوری) 5ـ کامپوزیت ها

مراجع:

* Introduction to dislocations D. Hull

* Mechanical Metallurgy Dceter

عیوب بلوری:

بلور در حالت کلی دارای نظم است. هر بی نظمی در بلور، عیب محسوب می شود.

عیب در بلور بر حسب بُعدشان تقسیم بندی می شوند:

۱ـ عیب نقطه ای (بدون بعد) 2ـ عیب خطی 3ـ عیب سطحی

الف * عیوب نقطه ای:

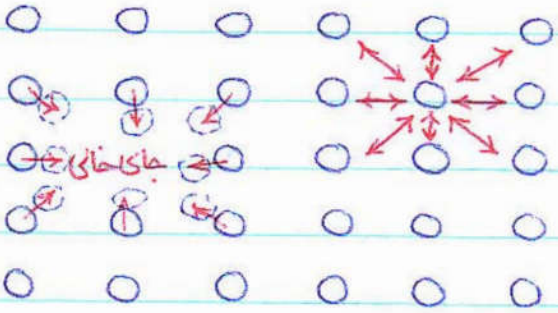
I. جای خالی (Vacancy) II. بین نشین (Intertitials)

III. اتم های ناخالصی (Impurities)

موسسه مواد شریف

I. Vacancy :

اتم‌های شبکه در حالت عادی سرجایشان قرار دارند و از انرژی min برخوردار هستند و در نتیجه به هم نیروئی وارد نمی‌کنند. بنابراین هرگونه تغییری در این ساختار موجب ایجاد میدان تنش می‌شود.



اتم‌های اطراف این جای خالی، به سمت حفره کشیده می‌شوند و در شبکه نوعی فشردگی در این قسمت دیده می‌شود. در نتیجه در این محل، میدان کرنش ایجاد می‌شود. این حرکت اتم‌ها، الاستیک است یعنی برگشت پذیر است بطوریکه اگر اتم سرجایش برگردد، عیب برطرف می‌شود.

وجود تعدادی از این عیوب می‌تواند در حال تعادل باشد؛ برای اینکه بتوانیم Vacancy ایجاد کنیم، نیاز به صرف انرژی می‌باشد یعنی به سیستم انرژی افزوده می‌شود.

E : انرژی اکتیواسیون برای ایجاد یک Vacancy

برای n Vacancy : $\Delta G = nE - T\Delta S$

در مورد Vacancy های کم: $nE < |T\Delta S|$ ← تعادل: $\Delta G < 0$

موسسه مواد شریف

ΔS : مربوط به تعداد آرایش های ممکن برای Vacancy هاست (انتروپی)

$\Delta S = K \ln \omega$ ω : تعداد آرایش های ممکن

رابطه ی تعداد Vacancy های در حال تعادل :

$$n_v = N \exp\left(\frac{-E}{KT}\right)$$

n_v : تعداد Vacancy های در حال تعادل در دمای T.

N : تعداد کل اتم های شبکه E : انرژی اکتیواسیون یک Vacancy

K : ضریب ثابت بولتزمن T : دمای مطلق

پیدا کردن ω : N (تعداد کل اتم ها) n (Vacancy)

$$N(N-1)\dots(N-n+1)$$

Vacancy اول در N جای مختلف امکان قرارگرفتن دارد و Vacancy، n ام در $N-n+1$ جای مختلف. چون همهٔ Vacancy ها مشابه هستند، پس تعداد بالا، $n!$ بار تکرار شده است. (Vacancy سوم، $n-2$ بار تکرار شده است)

$$W = \frac{N(N-1)\dots(N-n+1)}{n!} \times \frac{(N-n)(N-n-1)\dots 1}{//} = \frac{N!}{n!(N-n)!}$$

موسسه مواد شریف

یک تعدادی از vacancy ها تعادل ترمودینامیکی دارند. (انرژی را کاهش می دهد $\Delta G < 0$)

مثال – مس: $T = 300^\circ K \mid n_v/N \cong 10^{-12}$ $\quad E \simeq 0.7\ eV$

به ازای هر 10^{12} اتم، یک vacancy وجود دارد.

اگر دما را بالا ببریم، $T_2 = 1200^\circ K$ (هنوز مس ذوب نشده است) در این دما: $\frac{n_v}{N} \cong 10^{-3}$

در نتیجه، تعداد vacancy ها، 10^9 برابر شده است. پس تعداد vacancy ها، متناسب است با درجه حرارت.

عیوب نقطه ای را نمی توان مستقیماً مشاهده نمود. تعداد این عیوب را با خواص خود بلور می سنجیم. یعنی از خواص بلور به تعداد vacancy ها می رسیم.

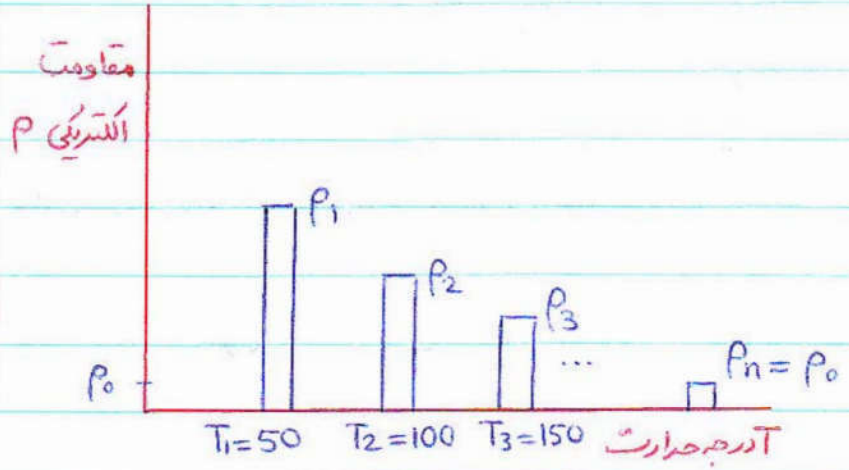
مثلاً، هدایت الکتریکی که یکی از خواص مهم فلزات است و مربوط به الکترون های آزاد می باشد. (الکترون های واقع شده در لایه ای خاص که متعلق به هیچ اتمی نیستند ولی متعلق به همهٔ اتم ها می باشند) با افزایش دما، هدایت الکتریکی کم می شود (مقاومت زیاد می شود) در حالیکه، تعداد vacancy ها زیاد می شود. در نتیجه، vacancy ها با resistance مرتبط هستند.

ρ_0 : مقاومت مس در دمای محیط قبل از گرم کردن و کوئنچ کردن.

موسسه مواد شریف

ρ_1 : مقاومت بعد از کوئنچ کردن در دمای $50^\circ C$.

ρ_2 : مقاومت بعد از کوئنچ کردن در دمای $100^\circ C$ و ...



وقتی در دمای $T=1000^\circ C$ هستیم، تعداد زیادی Vacancy وجود دارد و وقتی سریع سرد می‌کنیم

به دمای $T=20^\circ C$ می‌رسانیم چون در این دما، تعداد Vacancy های در حال تعادل خیلی

کمتر است، در نتیجه تعداد زیادی Vacancy بصورت غیرتعادلی در $T=20^\circ C$ باقی می‌ماند.

در مرحله بعد، درجه حرارت را به $T_1 = 50^\circ C$ رسانده و بعد دوباره به $T=20^\circ C$ می‌رسانیم و

به همین ترتیب. با این سرد و گرم کردن‌های متوالی به حالت تعادل نزدیک می‌شویم (ρ_0) و در

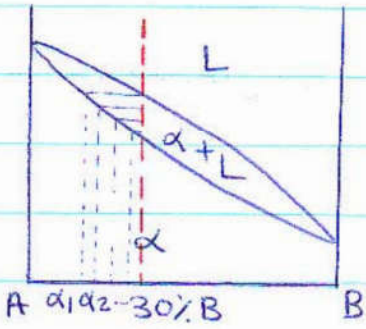
نتیجه تعداد Vacancy ها کم‌تر شده و مقاومت کم می‌شود.

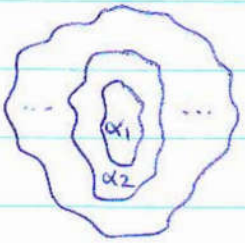
یکی از خواص مهم فلزات نفوذ است. (حرکت اتم‌ها در داخل فلز). Vacancy ها یکی از

عوامل مهم نفوذ یا حرکت اتم‌ها می‌باشند.

موسسه مواد شریف

یادآوری: در سرد کردن غیرتعادلی آلیاژهای با حلالیت کامل در حالت جامد:

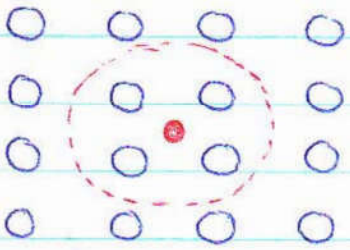




ترکیب در مرکز دانه با کنار دانه، فرق می‌کند. (coring)

که همان زگرگاسیون کریستالی است. آلیاژ بدین ترتیب هموژن نیست. بنابراین تا زیرمنحنی سلیدوس گرم می‌کنیم تا هموژن شود. درواقع با افزایش درجه حرارت اتم‌های A و B طوری حرکت می‌کنند تا ترکیب بصورت یکنواخت 70 – 30 برقرار شود. علت افزایش دما این است که نفوذ راحت‌تر می‌شود. (تعداد vacancy هاهم زیاد می‌شود) درواقع حرکت اتم‌ها با حرکت vacancy ها راحت‌تر می‌شود. بعبارت دیگر: حرکت اتم ≡ حرکت vacancy.

ب – اتم‌های بین نشین:



این اتم بین نشین در اطراف خود یک میدان کرنش ایجاد می‌کند. اتم‌های بین نشین از خود شبکه دوست دارند فرار بگیرند زیرا انرژی الکتروا سیون خیلی زیادی می‌خواهد.

موسسه مواد شریف

در شرایط عادی اتم بین نشین نمی‌تواند از جنس اتم‌های شبکه باشد؛ مگر با اعمال انرژی زیاد یا بمباران با هسته‌ی سنگین مثل هلیوم.

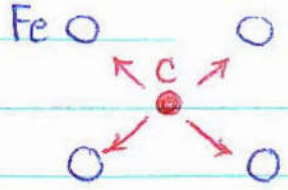
- اتم‌های ناخالصی:

منظور همان محلول جامد است. solid solution

این محلول‌ها دو گونه اند: 1- بین نشین 2- جانشین.

در مورد محلول جانشین، اتم ناخالصی جای اتم شبکه را می‌گیرد و چون اختلاف شعاع اتمی وجود دارد، بی نظمی در اطراف خود ایجاد می‌کند. اگر شعاع اتم ناخالصی کمتر از اتم شبکه باشد در شبکه فشردگی ایجاد می‌کند و اگر شعاع اتم ناخالصی بیشتر از اتم شبکه باشد، در شبکه بازشدگی ایجاد می‌کند. در مورد فشردگی، اتم‌های ناخالصی، اتم‌های شبکه را به سمت خود کشیده و جمع شدگی در یک قسمت از شبکه ایجاد می‌کند.

در مورد بین نشین، شعاع اتم ناخالصی باید کمتر از $1^{\circ}A$ باشد. این اتم کربن نیز اطراف خود را بی نظم کرده است. (ایجاد میدان کرنشی در اطراف خود.)



موسسه مواد شریف

در مورد بین نشین همیشه بازشدگی داریم درحالیکه در جانشین فشردگی یا بازشدگی داریم؛

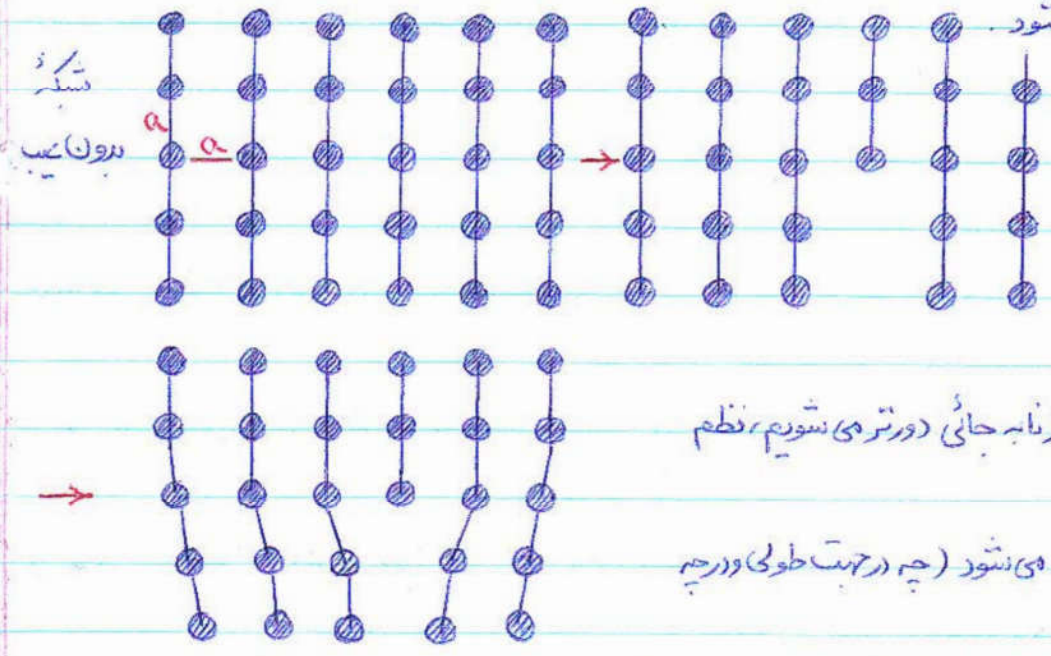
برحسب شعاع اتم ناخالصی.

عیوب خطی:

عیوب خطی یا نابه جائی (dislocation)، عیوب یک بعدی هستند.

تذکر. سطوح بلوری، سطوحی هستند که روی آن ها، نقاط مادی وجود دارد. در شبکه های اتمی ممکن است صفحه ای باشد که روی آن اتمی نباشد، این صفحه، سطح بلوری نیست.

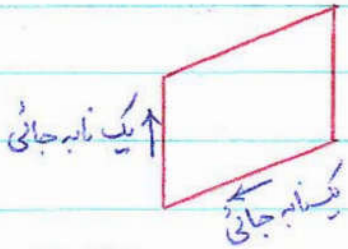
در شبکه ی f.c.c، صفحات {110} را در نظر می گیریم. تمام بلور از چیدن این صفحات ایجاد می شود.



موسسه مواد شریف

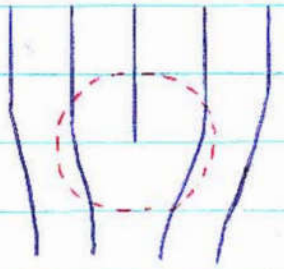
انتهای این صفحه نابه جائی یک خط عمود برصفحه وجود دارد. (خط نابه جائی) زیراین خط هیچ اتمی وجود ندارد. نابه جائی فوق از نوع پله ای است. (Edge dislocation)

این خط تا بینهایت نمی رود و به سطح بلور یا مرزدانه منتهی می شود و دیگر درسطح بلور نابه جائی نداریم. ممکن است این نیم صفحه همراه با صفحات دیگر که بصورت کامل هستند، ادامه نیابد، دراین صورت دردو جهت نابه جائی داریم. بعبارتی دو خط نابه جائی داریم.



1385.11.29

درمورد نابه جایی پله ای، درانتهای نیم صفحه، یک میدان کرنش بوجود می آید.



این منطقه درسه بعد بصورت یک استوانه تصور می شود.

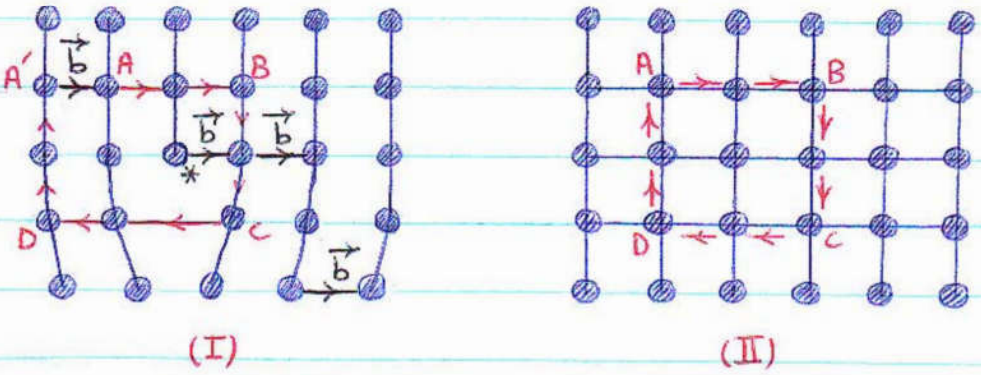
فواصل بین اتمی دربالای خط نابه جائی نسبت به پائین این خط کمتر است.

تعریف بردار برگرس: این بردار مشخصه ی نابه جائی است.

موسسه مواد شریف

صفحات یکسانی از شبکه‌ی بلوری را درنظر می‌گیریم. در یکی عیب خطی وجود دارد و دیگری

بدون عیب است. مثلاً هردو {100} است.



(I) (II)

یک مسیر بسته درشبکه‌ی II درنظر می‌گیریم. (ABCD) این مسیر را روی شبکه‌ی I طوری

قرار می‌دهیم که نابه‌جائی داخل آن بیفتد. واضح است که مسیر در شبکه‌ی I بسته نخواهد شد.

برداری که این مسیر را می‌بندد، بردار برگرس نام دارد. این بردار دارای جهت است و حتماً بین

دو اتم قرار دارد. $\vec{AA'} = \vec{b}$

این بردار یک جهت بلوری است و مستقل از مکان است.

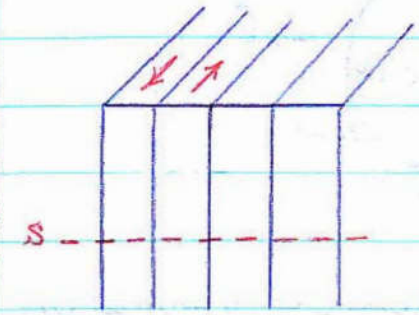
در حالت خاص *، بردار برگرس عمود بر خط نابه‌جائی است. در این حالت نابه‌جائی از

نوع لبه ای یا نابه ای (Edge dislocation) است.

اگر بردار برگرس موازی خط نابه جایی باشد، نابه‌جایی را نابه‌جایی پیچی می‌نامیم.

موسسه مواد شریف

در حالت نابه جائی پیچی ، دو صفحه تا سطح S ، نسبت به هم لغزیده اند .



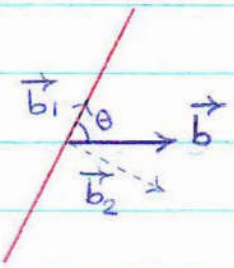
بعبارتی در بالای S نوعی بی نظمی وجود دارد و در پائین S

این بی نظمی دیده نمی شود .

* نابه جائی ها به سه صورت زیر هستند :

1 - نابه جائی پله ای 2 - نابه جائی پیچی 3 - نابه جائی مختلط

در مورد نابه جائی مختلط (mixed dislocation) بردار برگرس و خط نابه جائی با هم زاویه θ ($\theta \neq 0, 90$) را می سازند .



$$\vec{b} = \vec{b_1} + \vec{b_2}$$

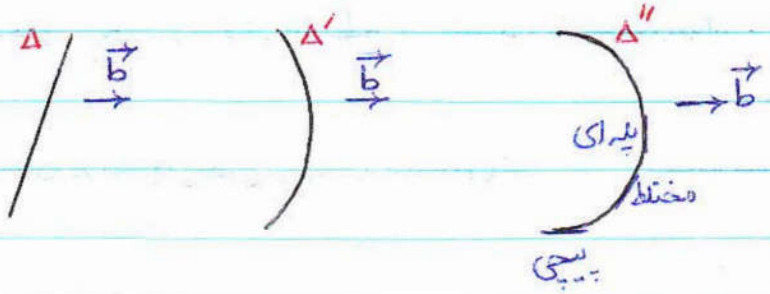
در این حالت ، نابه جائی یک مؤلفه ی پله ای ($\vec{b_2}$) و یک مؤلفه ی پیچی ($\vec{b_1}$) دارد .

* کلیاتی در ارتباط با خط نابه جائی و بردار برگرس :

1 - بردار برگرس جهت بلوری است و مستقل از مکان و حتماً بین دو اتم قرار می گیرد .

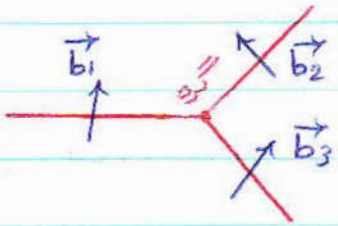
2 - بردار برگرس مستقل از خط نابه جائی هم می باشد . بعبارتی خط نابه جائی می تواند حرکت کند و در طی حرکتش تغییر شکل دهد ولی بردار برگرس آن ثابت می ماند .

موسسه مواد شریف



درواقع کارائی نابه جائی تغییر می‌کند ولی بردار برگرس آن تغییر نمی کند . بردار برگرس را در حالت سکون تعریف کردیم و وقتی نابه جائی حرکت می‌کند هم، همان بردار برگرس سابق را در نظر می‌گیریم .

3 ـ یک خط نابه جائی در داخل بلور نمی تواند انتهای آزاد داشته باشد . یا انتهای خط نابه جائی به سطح بلور می رسد و یا با نابه جائی های دیگر ، تشکیل گره نابه جایی می دهد . در کریستال ، سطح بلور همان مرز دانه است . گره وقتی تشکیل می شود که حداقل سه خط نابه جایی به هم برسند .



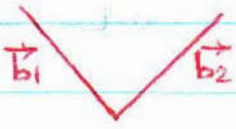
$$\vec{b_1} = \vec{b_2} + \vec{b_3}$$

مجموع بردار های برگرس در گره صفر است بعبارتی در گره دیگر نابه جائی وجود ندارد . (لزومی ندارد که نابه جائی ها یکسان یا از یک نوع باشند .)

بعبارتی :

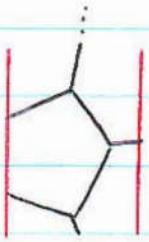
$$\sum \vec{b_i} = 0$$

یک نابه جائی به نابه جائی دیگر تبدیل نمی‌شود بعبارتی حالت زیر وجود ندارد .



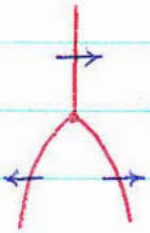
موسسه مواد شریف

بنابراین ، حداقل 3 نابه جائی تشکیل گره می‌دهد. (اینجا گره مثل گره در مدارهای الکتریکی است (قانون KCL)



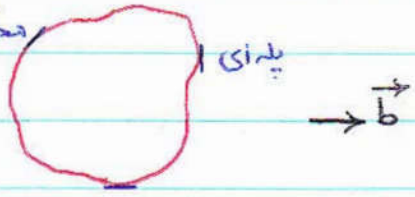
اگر نابه جائی ها به هم متصل شوند ، شبکه‌ی نابه جائی ایجاد می‌شود . مثلاً در یک تک کریستال که مرز دانه نداریم ، پس خط نابه جائی ها یا به سطح بلور می‌رسند ویا به یکدیگر.

یک نابه جائی می‌تواند به دو نابه جائی تجزیه شود :



مجموع بردارهای برگرس صفر می‌شود ← گره

چون خطوط نابه جائی انتهای آزاد ندارند ، می‌توانیم حلقه‌ی نابه جائی داشته باشیم ، و بردار برگرس نیز ثابت است .



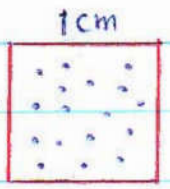
برای Vacancy ها ، دانسیته تعریف کردیم . در مورد نابه جائی ها نیز این تعریف را داریم :

$$\text{دانسیته‌ی نابه جائی} = \frac{\text{طول کل خطوط نابه جائی}}{\text{حجم}}$$

امّا بطور کلی نمی‌توان طول نابه جائی را بدست آورد .

$$\text{دانسیته‌ی نابه جائی} = \frac{\text{تعداد خطوط نابه جائی}}{\text{واحد سطح}}$$

موسسه مواد شریف



تعداد نابه جائی که از این واحد سطح گذشته است $\rightarrow \frac{\text{خط}}{cm^2} = cm^{-2}$

البته این مقدار دانسیته‌ی اصلی را به ما نمی دهد ولی بطور نسبی می توان بررسی نمود.

$d_1 > d_2$

دانسیته‌ی نابه جائی در حالتیکه هیچ تنش و تغییر شکلی اعمال نکرده باشیم (تعادل مکانیکی) در حدود $10^6 \frac{\text{خط}}{cm^2}$ می باشد. در واقع با هیچ عملیات حرارتی، از این مقدار کمتر نمی شود.

نابه جائی ها برخلاف vacancy ها هیچ گاه در تعادل ترمودینامیکی نیستند. نابه جائی ممکن است تعادل مکانیکی داشته باشد (به هم نیرو وارد نکند) اما تعادل ترمودینامیکی ندارد و همواره انرژی را افزایش می دهد. نابه جایی حین انجماد بوجود می آید و وقتی بوجود آمد دیگر از بین نمی رود.

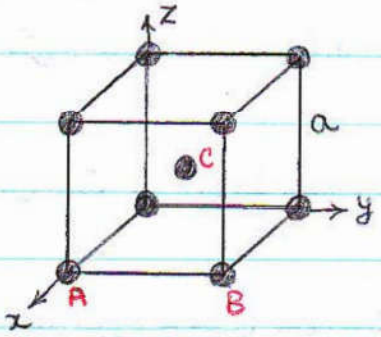
وقتی تغییر شکل می دهیم، $d \cong 10^9$ می شود و اگر بعد از تغییر شکل، آنیل کنیم d دوباره کم می شود.

عامل اصلی تغییر شکل پلاستیک، نابه جائی ها هستند. یعنی اگر نابه جائی ها نباشند، تغییر شکل امکان ندارد.

موسسه مواد شریف

* بردار برگرس را می‌توان با پارامتر شبکه و جهت بلوری تعیین نمود :

مثلاً برای شبکه‌ی B.C.C :



در راستای x : [100]

$\vec{b} = a[100] = \vec{OA}$

$\vec{b} = a[110] = \vec{OB}$ $\qquad$ $\vec{b} = \frac{a}{2}[111] = \vec{OC}$

مثلاً برای $\vec{OB}$: تصویر روی x $\equiv a$ $\qquad$ روی y $\equiv a$ $\qquad$ روی z $\equiv o$

$\frac{a}{2}[111]$ در f.c.c وجود ندارد . زیرا در مرکز مکعب برای f.c.c اتمی وجود ندارد ؛ چراکه

$\vec{b}$ باید بین دو اتم باشد .

حرکت نابه جائی :

یک خط نابه جائی تحت تأثیر تنش ، روی سطح لغزش خود می‌تواند بلغزد (حرکت کند) .

1 – سطح لغزش چیست ؟

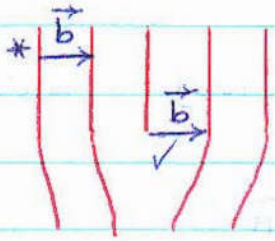
2 – چه شرایطی برای حرکت نابه جائی وجود دارد ؟

1 ← سطح لغزش : مجموعهٔ خط نابه جائی و بردار برگرس که یک صفحه را تشکیل می دهند .

موسسه مواد شریف

در مورد نابه جائی پله ای ، زمانی می توان صفحهٔ لغزش داشت که $\vec{b}$ روی خط نابه جائی واقع

شود . در نتیجه نابه جائی پله ای سطح لغزش منحصربفرد دارد . (فقط یک صفحه)



در حالت * ، دو خط متعامد (متنافر) داریم .

اما در مورد نابه جائی پیچی سطح لغزش مشخصی وجود ندارد

و بنهایت سطح لغزش وجود دارد . در واقع هر سطحی که از خط نابه جائی عبور کند ، سطح لغزش

است .

2 ← شرط لغزش این است که : سطح لغزش و جهت لغزش (بردار برگرس) فشرده

باشند . در واقع لغزش روی سطح فشرده و جهت لغزش فشرده می تواند رخ بدهد .

سیستم فشرده (لغزش) ≡ مجموعه‌ی سطح فشرده + جهت فشرده

شبکهٔ بلور	سطوح فشرده	جهت فشرده	سیستم لغزش
F.C.C	4تا {111}	3تا <110>	12تا {111}<110>
B.C.C	6تا {112} یا {110}	2تا <111>	12تا {110}<111> (ظاهراً)
H.C.P	1 {0001}	3تا <11$\bar{2}$0>	3تا {0001}<11$\bar{2}$0>

اما از لحاظ راحت تر بودن لغزش : F.C.C > H.C.P > B.C.C

زیرا ساختار F.C.C و H.C.P فشرده تر از B.C.C است .

موسسه مواد شریف

حرکت نابجائی :

۱ـ حرکت لغزشی (لغزش) 2ـ حرکت صعودی (صعود)

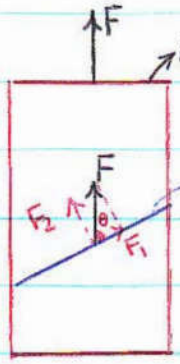
۱ـ حرکت لغزشی :

نابجائی روی سطح لغزش می‌تواند بلغزد :

الف ـ محاسبه‌ی تنش مؤثر در حرکت نابجائی

ب ـ مکانیزم حرکت نابجائی

ج ـ نتیجه‌ی حرکت نابجائی



الف. F_1 : مؤلفه‌ی برشی F_2 : مؤلفه‌ی نرمال

سطح لغزش تک کریستال

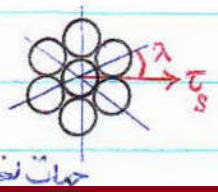
تنش کششی $\sigma = \frac{F}{S}$

A : مساحت سطح لغزش

$$\tau = \frac{F_1}{A} = \frac{F\cos\theta}{\frac{S}{\sin\theta}}$$

$$\Rightarrow \tau_s = \frac{F}{S}\sin\theta\cdot\cos\theta = \frac{\sigma}{2}\sin 2\theta$$

اما این تنش روی سطح لغزش باید روی جهت لغزش تجزیه شود :

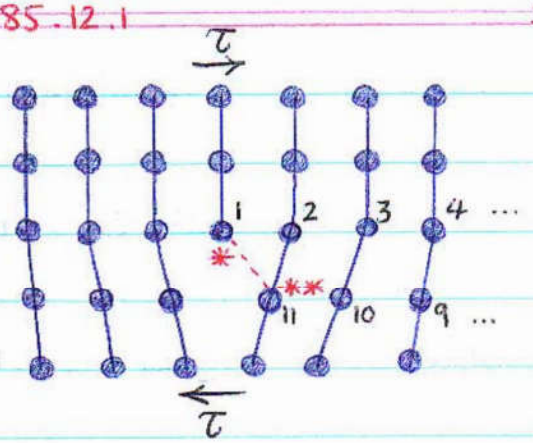


$$\tau_{rs} = \frac{\sigma}{2}\sin 2\theta\cdot\cos\lambda$$

λ : زاویه‌ی بین تنش τ_s و جهت لغزش

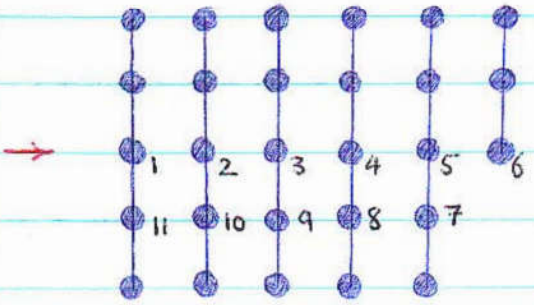
موسسه مواد شریف

ب. یک نابجائی پله‌ای را در نظر می‌گیریم.



فرض می‌کنیم، تنش برشی τ را روی سطح لغزش وارد می‌کنیم. اتم * فقط با سه اتم دیگر پیوند دارد.

تحت این تنش τ، اتم * با اتم ** می‌تواند پیوند برقرار کند. در نتیجه نابجائی پله‌ای، یک پله به سمت راست حرکت می‌کند. این پیوند جدید بدلیل الاستیک بودن شبکه می‌تواند تشکیل شود.



در اثر حرکت این نابجائی، وقتی به انتها می‌رسد یک پله درست می‌کند به همین دلیل نابجائی پله نام دارد.

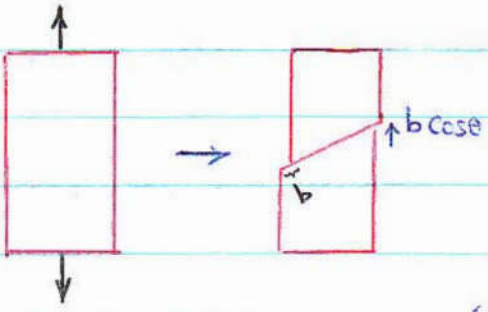
حرکت نابجائی براساس تغییر موقعیت عیب است. در واقع اتم‌ها منتقل نمی‌شوند بلکه در اثر تغییر پیوند بین اتم‌ها، میدان تنش یا انرژی حرکت می‌کند. مثل موج. که موقع انتقال آن نقاط ماری منتقل نمی‌شوند بلکه انرژی انتقال می‌یابد. مکانیزم حرکت نابجائی، تغییر پیوند ها بصورت اتم به اتم است در نتیجه موقعیت نابجائی روی سطح لغزش حرکت می‌کند. این نابجائی به سطح که می‌رسد یک پله ایجاد می‌کند. علت اینکه نابجائی روی سطح فشرده می‌لغزد نیز همین است. در غیر اینصورت فاصله بین

موسسه مواد شریف

اتم‌ها زیاد شده و برقراری پیوندهای جدید و تغییر مکان پیوندها میسر نیست زیرا انرژی زیادی می‌خواهد.

اگر دما زیاد باشد، ارتعاشات اتمی زیاد است و پیوندها راحت‌تر می‌توانند جابه‌جا شوند. در نتیجه نابجایی راحت‌تر حرکت کرده و شکل دادن راحت‌تر می‌شود.

ج. حرکت نابجایی یک پله با اندازه‌ی بردار برگرس خود ایجاد می‌کند. بنابراین در راستای لغزش (سطح لغزش) جابجایی با اندازه‌ی b است. در جهت عمودی مجموع $b\cos\theta$ ها، تغییر طول را می‌دهد و مجموع



$b\sin\theta$ ها، تغییر عرض را.

امّا در بلی کریستال مسئله فرق می‌کند ولی باز هم

$b\cos\theta$ ها، تغییر طول را می‌دهد. در نتیجه می‌توان

گفت حرکت نابجایی‌ها موجب تغییر شکل پلاستیک می‌شود. هرگونه حرکت نابجایی به هر اندازه‌ای

تغییر شکل ایجاد می‌کند. (ممکن است درصدی از b باشد)

افزایش انرژی = ازدیاد طول = حرکت نابجایی

تغییر شکل نابجایی تک‌حدی ($R=\frac{\ell}{2}$) می‌تواند برگردد [البته با حذف نیرو] و این دلیل کشش خطی

نابجایی است. پس تا $R=\frac{\ell}{2}$، تغییر شکل نابجایی الاستیک است.

موسسه مواد شریف

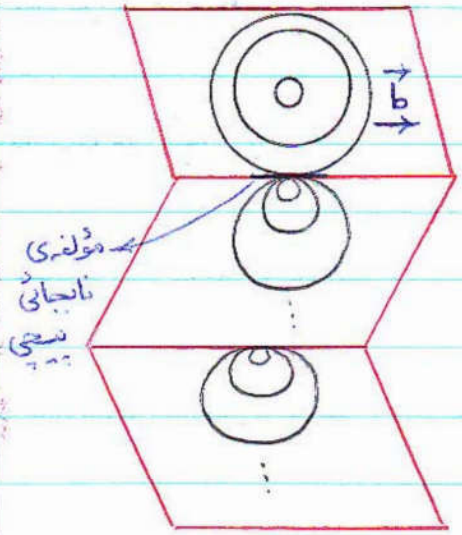
گفته شد که نابجائی پله‌ای روی صفحهٔ لغزش منحصربفردی می‌تواند حرکت کند ولی نابجائی پیچی

بی‌نهایت سطح لغزش دارد و می‌تواند این صفحات را تغییر دهد . در سیستم h.c.p ، نابجائی پیچی

نمی‌تواند سطح لغزش خود را عوض کند زیرا این صفحات {0001} موازی هستند . اما در f.c.c

صفحات {111} که صفحات لغزش هستند باهم تلاقی دارند ، نابجائی پیچی می‌تواند صفحهٔ

لغزش خود را تغییر دهد . [لغزش تقاطعی]



تذکر . لغزش تقاطعی منحصر به نابجائی پیچی است .

در شکل ، نابجائی در محل تقاطع صفحات لغزش دارای

مؤلفه‌ی پیچی است . ← صفحهٔ لغزش خود را عوض می‌کند .

[در اثر اعمال تنش ، حلقه‌های نابجائی بزرگ می‌شود]

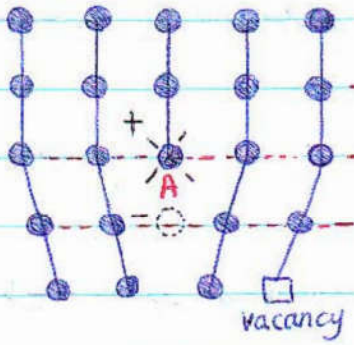
نابجائی پله‌ای نمی‌تواند سطح لغزش خود را عوض کند زیرا تغییر سطح لغزش نیازمند انرژی دارد .

صعود نابجائی : [مختص به نابجائی پله‌ای است]

عبارتست از حرکت نابجائی پله‌ای عمود بر سطح لغزش خودش . از بین کل اتم‌های موجود در خط

نابجائی ، فقط اتم A را در نظر می‌گیریم .

موسسه مواد شریف



اگر به هر دلیلی اتم A برداشته شود، سطح لغزش از

S به S' تغییر می‌کند. این صعود را مثبت می نامند.

اگر به هر دلیلی، یک اتم زیر اتم A اضافه شود، سطح

لغزش از S به S'' تغییر می‌کند. این صعود، صعود منفی نام دارد. بنابراین در مورد صعود، یک اتم

به یک قسمت از این نیم صفحه اضافه یا کم می‌شود.

مکانیزم صعود مثبت:

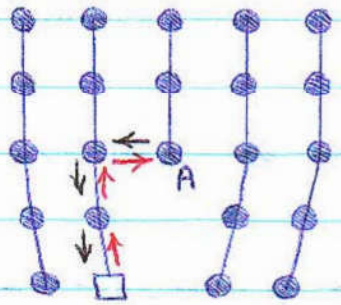
یعنی اتم A برداشته شود. دو مکانیزم را می‌توان در نظر گرفت که جای اتم A خالی شود:

1- نفوذ vacancy ها به طرف خط نابجائی و جذب آن ها روی خط نابجائی.

2- تشکیل یک اتم بین نشین (اتم A) زیر خط نابجائی و حرکت آن در داخل بلور (نفوذ).

مورد 1- یک vacancy در داخل شبکه می‌تواند حرکت کند. اگر یک vacancy جای اتم A بنشیند

جای A خالی می‌شود.



مورد 2- زیر اتم A، منطقه‌ی بازی وجود دارد. (انبساط یافته)

اگر اتم A به سمت این منطقه حرکت کند و بین اتم‌های این

موسسه مواد شریف

منطقه بصورت بین نشین قرارگیرد و به همین ترتیب حرکت کند جای اتم A خالی می‌شود اما این مکانیزم نمی‌تواند صورت گیرد زیرا تشکیل فضای بین نشین از اتم‌های هم‌نوع شبکه عملاً صورت نمی‌گیرد (در شرایط عادی) زیرا انرژی زیادی می‌خواهد.

مکانیزم صعود منفی:

مانند مورد قبلی دو مکانیزم دارد که یکی از آنها عملی نیست:

1- یک اتم بصورت بین نشین جای دیگر از شبکه وجود دارد و این اتم به سمت فضای زیر خط نابجائی یا زیر اتم A حرکت می‌کند و بدین ترتیب صعود منفی ایجاد می‌شود. این مکانیزم از لحاظ هندسی منطقی است ولی از لحاظ فیزیکی این مکانیزم عملی نیست.

2- منطقه‌ی زیر اتم A منبسط شده است و یک Vacancy می‌تواند تشکیل شود و این Vacancy حرکت کند و جای خود را با دیگر اتم‌ها عوض کند. در این صورت یک اتم زیر اتم A قرار می‌گیرد. ایجاد Vacancy نیاز به انرژی دارد.

بطور کلی مکانیزم صعود نابجائی نیاز به انرژی دارد و معمولاً در دمای بالا انجام می‌شود. هم‌چنین صعود نابجائی وابسته به Vacancy و حرکتشان است.

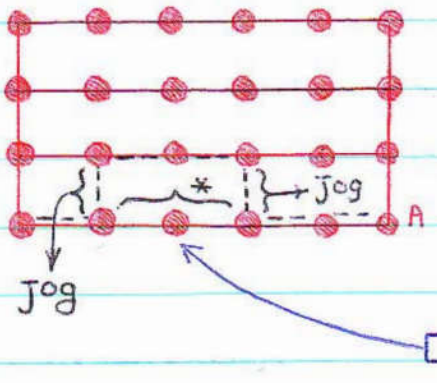
موسسه مواد شریف

مکانیزم حرکت vacancy ، نفوذ است البته در جهت برقراری حالت تعادل.

گفته شد که صعود منفی [ایجاد vacancy ← افزایش دانسیته‌ی vacancy] و صعود مثبت [جذب vacancy ← کاهش دانسیته‌ی vacancy] نابجائی مربوط به جای‌خالی یا vacancy ها می‌باشد. یا بعبارتی با vacancy کنترل می‌شود.

نکته‌ی خیلی مهم: در شرایطی که تعداد vacancy ها بیش از حالت تعادل است، صعود مثبت نابجائی اولویت دارد نسبت به صعود منفی نابجائی.

حال کل خط نابجائی را در نظر می‌گیریم:



در مورد صعود مثبت:

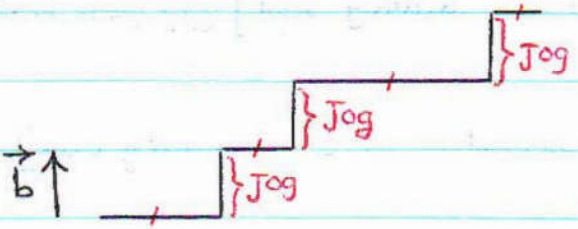
← جهت دید قبلی

با آمدن vacancy جای اتم مشخص ، قسمت * حذف شده از شبکه و خط نابجائی بصورت - - - - در می‌آید. بعبارتی در خط نابجائی ، یله ایجاد می‌شود یا شکسته می‌شود. هم چنین ملاحظه می‌شود ، یک قسمت از خط نابجائی صعود کرده است. vacancy دوم ممکن است هر جائی

موسسه مواد شریف

قرارگیرد ولی اگر قرار بگیرد، خط نابجائی در آن قسمت صعود می‌کند. و به همین ترتیب تا شکل زیر

از خط نابجائی بطور شماتیکی بوجود آید:



قسمت های مختلف نابجائی که در شکل

با علامت " / " مشخص شده است

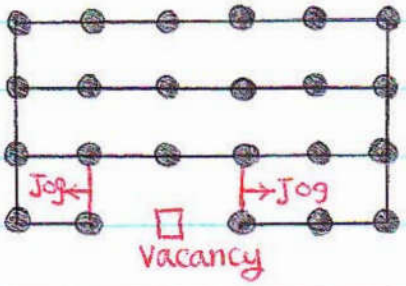
هریک در اثر اعمال نیرو مستقل از هم حرکت می‌کند. چون تنش روی صفحات موازی یکسان

است.

تذکر. جایگزینی Vacancy به جای اتم‌های شبکه کاملاً اتفاقی است.

اگر بردار برگرس در شکل بالا بصورت فوق باشد، قسمت های Jog در خط نابجائی از نوع پیچی

و بقیه از نوع پله ای است.



در مورد صعود نابجائی:

با جذب یا نفوذ Vacancy ها، Jog ها به سمت

سطح حرکت می‌کند. (انتهای خط نابجائی)

انرژی صعود (Uc) : c مخفف climb است.

موسسه مواد شریف

$$U_c = U_j + U_v + U_m$$

U_j : انرژی تولید Jog U_v : انرژی ایجاد Vacancy

U_m : انرژی برای حرکت Vacancy

علت وجود U_v در رابطه به این دلیل است که وجود Vacancy ها خود یک انرژی دارد.

ابتدا و انتهای خط نابجائی روی سطح است و برای آن‌ها صعود معنی ندارد.

تذکر: Jog همیشه روی خط نابجائی وجود دارد. بعبارتی قبل از صعود نابجائی، Jog ها روی خط نابجائی از قبل وجود داشتند در نتیجه از U_j در برابر U_v و U_m می‌توان صرفنظر کرد.

$$\rightarrow U_c = U_v + U_m$$

تذکر: Jog در برخورد نابجائی‌ها نیز ممکن است بوجود آید.

تذکر مهم: وجود Jog $\equiv$ ازدیاد طول.

85.12.6 خواص الاستیک (کشسان) نابجائی‌ها:

گفته شد که نابجائی در اطراف خود میدان کرنش الاستیک ایجاد می‌کند. بنابراین در این منطقه میدان تنش نیز وجود دارد. این میدان الاستیک است یعنی با حذف نیرو یا تنش اعمالی، این

موسسه مواد شریف

میدان نیز حذف می‌شود. سؤال این است که:

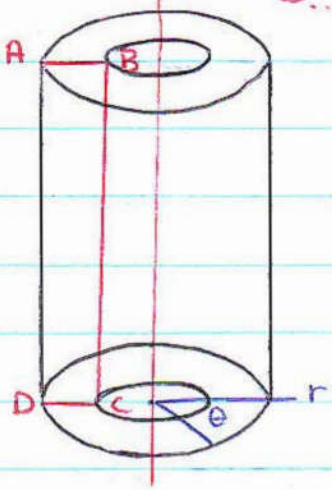
افزایش انرژی سیستم (جذب انرژی) در اثر وجود میدان تنش چقدر است؟

برخط ناپیوستگی دو نوع نیرو ممکن است وارد شود: 1- تنش اعمالی 2- از ناپیوستگی‌های دیگر

مقدار این نیرو چگونه است؟

بدست آوردن میدان تنش و کرنش:

برای ناپیوستگی پیچی: خط ناپیوستگی $\equiv z$



اعوجاج کشسان در اطراف یک ناپیوستگی مستقیم

با طول نامحدود را می‌توان توسط یک استوانه‌ای

از ماده‌ی کشسان نشان داد.

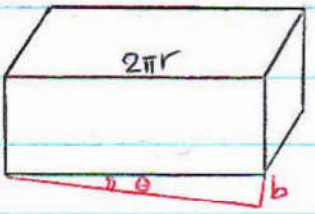
اگر استوانه را باز کنیم به مکعب مستطیل خواهیم رسید. (؟) استوانه روی صفحه‌ی ABCD

برش خورده و در جهت z می‌لغزانیم. (شکل صفحه ۱۰۱ کتاب) اگر یک مدار بسته حول

محور z در نظر بگیریم، در هر دور چرخش باندازه‌ی b پائین یا بالا می‌رویم.

$$\varepsilon_{\theta z} = \frac{b}{2\pi r} \qquad \varepsilon_r = \varepsilon_\theta = \varepsilon_z = \varepsilon_{\theta r} = \varepsilon_{rz} = 0$$

موسسه مواد شریف



در نیروی برشی $\tan\theta = \frac{b}{2\pi r} = \theta = \gamma$

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

در مختصات کارتزین :

$$\sigma_{xz} = \sigma_{zx} = -\frac{Gb}{2\pi}\frac{y}{x^2+y^2}$$

$$\sigma_{yz} = \sigma_{zy} = \frac{Gb}{2\pi}\frac{x}{x^2+y^2}$$

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \sigma_{xy} = \sigma_{yx} = 0$$

در مورد نابجائی پله ای :

$$\sigma_{xx} = \sigma_x = -Dy\frac{3x^2+y^2}{(x^2+y^2)^2} \qquad \sigma_{yy} = \sigma_y = Dy\frac{x^2-y^2}{(x^2+y^2)^2}$$

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

$$\sigma_{xz} = \sigma_{zx} = \sigma_{yz} = \sigma_{zy} = 0 \qquad D = \frac{Gb}{2\pi(1-\nu)}$$

برای نابجائی پله ای، همان استوانه را در نظر می گیریم و خط نابجائی بطول بینهایت را منطبق بر z گرفته

و بردار برگرس روی محور x (افقی) است . سطح لغزش درین ترتیب ، سطح xz است .

جهت برش دادن نیز در جهت x است . (لغزش بعد از برش در جهت x می باشد)

از روابط بالا مشخص می شود که اگر $r \to 0$ ، تنش به بینهایت میل می کند . یعنی در نزدیکی

موسسه مواد شریف

خط نابجائی تنش بینهایت می‌شود اما تنش بینهایت دربلور معنی ندارد. بنابراین در منطقه‌ی خیلی نزدیک به خط نابجائی این معادلات درست نمی‌باشد. بعبارتی برای مقادیر $r>r_0$ معادلات فوق جواب درست می‌دهد. معادلات فوق برای محیط‌های ماری پیوسته نوشته شده است یعنی دور از خط نابجائی. [این مسئله از فرض های اولیه بوده است.] درنزدیکی خط نابجائی که محیط پیوسته نیست باید اتم به اتم بررسی شود که ممکن نمی‌باشد. درنتیجه قانون در بازه‌ی $r<r_0$ وجود ندارد. انرژی را نیز باید در بازه‌ی $r>r_0$ محاسبه نمود. (منطقه‌ی $r<r_0$: core of dislocation)

انرژی الاستیک نابجائی:

۱ـ نابجائی پیچی:

در محدوده‌ی الاستیک: $\frac{E}{V}=\int \frac{1}{2}\sigma\, d\varepsilon$ (چگالی انرژی)

استوانه: $dV=2\pi r\, dr\, \ell$ $\qquad \int dE=\frac{1}{2}\int \tau\gamma\, dV$

$$E_{el}=\int_{r_0}^{r_1}\frac{1}{2}\tau\gamma\, 2\pi r\, dr\,\ell \qquad \gamma=\frac{b}{2\pi r}$$

انرژی بر واحد طول: $\ell=1$

$$\Rightarrow E_{el}=\frac{1}{2}\int_{r_0}^{r_1} b\tau\, dr\,\ell$$

انرژی بر واحد طول نابجائی پیچی:

$$\Rightarrow E_{el}=\frac{1}{2}\int_{r_0}^{r_1} b\tau\, dr$$

موسسه مواد شریف

$$E_{el} = \frac{1}{2}\int_{r_0}^{r_1} \frac{Gb^2}{2\pi r}\,dr = \frac{Gb^2}{4\pi}\int_{r_0}^{r_1}\frac{dr}{r} = \frac{Gb^2}{4\pi}\ln\frac{r_1}{r_0}$$

r_0 : ضریبی از b درنظر می‌گیرند بطوریکه نزدیک b باشد . $(r_0 = b \text{ or } 5b)$

r_1 : ممکن است تا انتهای بلور نیز برود درحالتیکه یک نابجائی داریم .

وقتی که چندین نابجائی داریم ، r_1 متوسط فاصله است . (فاصلهٔ متوسط نابجائی ها)

E_{cor} نیز باید اضافه شود که حدود چند الکترون ولت (eV) است .

۲ـ نابجائی پله‌ای :

$$E_{el} = \frac{1}{2}\int \tau b\,dr \qquad \tau_{r\theta} = \frac{Gb}{2\pi(1-\nu)}\frac{\cos\theta}{r}$$

* درمورد نابجائی پیچی $\tau_{z\theta} = \frac{Gb}{2\pi r}$ که دیگر به θ وابسته نیست (برخلاف نابجائی پله‌ای) واین مربوط می‌شود به این مسئله که نابجائی پله‌ای صفحهٔ لغزش مشخصی ندارد .

$$E_{el}(edge) = \frac{1}{2}\int_{r_0}^{r_1}\frac{Gb}{2\pi(1-\nu)}\,b\,\frac{\cos\theta}{r}\,dr$$

Zr : سطح لغزش بازای $\theta = 0$.

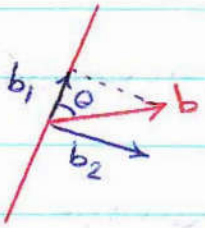
$$\Rightarrow E_{el}(edge) = \frac{1}{4}\frac{Gb^2}{\pi(1-\nu)}\ln\frac{r_1}{r_0}$$

چون $\nu < 1$ درنتیجه : $1-\nu < 1 \Leftarrow E_{el}(edge) > E_{el}(screw)$

موسسه مواد شریف

علت اینکه انرژی نابجائی پله‌ای بیشتر از نابجائی پیچی است این است که: نابجائی پیچی راحت‌تر بوجود می‌آید و تحرک بیشتری دارد.

۳ـ نابجائی مختلط:



در واقع یک مؤلفه‌ی پیچی و یک مؤلفه‌ی پله‌ای دارد:

$$E_{el}(mixed) = E_{el}(screw) + E_{el}(edge)$$

$$= \frac{Gb^2}{4\pi(1-\nu)}(1-\nu\cos^2\theta)\ln\frac{r_1}{r_0}$$

نتیجه:

$$E_{el} = \alpha G b^2$$

α: ضریب b: بردار برگرس G: ضریب الاستیسیته‌ی برشی

$$\Rightarrow E_{el} \propto b^2$$

ازاین نتیجه قانون فرانک بوجود می‌آید که براساس تجزیه و ترکیب نابجائی‌هاست. چنان‌چه این تجزیه و ترکیب در جهت کاهش انرژی باشد، انجام خواهد شد. منای کار، بردار برگرس است.

مثلاً:

$$b \rightarrow b_1 + b_2$$

اگر $b^2 < b_1^2 + b_2^2$ باشد، چون انرژی افزایش یافته است، تجزیه رخ نمی‌دهد ولی ترکیب می‌شود.

موسسه مواد شریف

مثال ۱. در سیستم F.C.C :

$$\frac{a}{2}[110] \rightarrow \frac{a}{6}[121] + \frac{a}{6}[21\bar{1}]$$

b_1 b_2 b_3

$b_1: \frac{a^2}{4}(1^2+1^2+0^2) = \frac{a^2}{2}$ $b_2: \frac{a^2}{36}[1+4+1] = \frac{a^2}{6}$ $b_3: \frac{a^2}{36}$

$$\Rightarrow b_1^2 = \frac{a^2}{2} > b_2^2 + b_3^2 = \frac{a^2}{3}$$

بنابراین تجزیه انجام خواهدشد . زیرا انرژی کاهش یافته است . از لحاظ برداری نیز این تجزیه صورت می گیرد :

مؤلفه‌ی اول : $\frac{a}{2} = \frac{a}{6} + \frac{2a}{6}$

مثال 2 . در سیستم B.C.C :

$$\frac{a}{2}[111] \rightarrow \frac{a}{6}[111] + \frac{a}{3}[111]$$

b_1 b_2 b_3

تذکر . بردار برگرس باید بین دواتم باشد . درمورد $\frac{a}{6}[111]$ ، در صفحه‌ی (112) بین دواتم می‌باشد.

$b_1: \frac{a^2}{4}[1^2+1^2+1^2] = \frac{3}{4}a^2$ $b_2: \frac{a^2}{36}[1^2+1^2+1^2] = \frac{a^2}{12}$

$b_3: \frac{a^2}{9}[1^2+1^2+1^2] = \frac{a^2}{3}$ $\Rightarrow b_1^2 > b_2^2 + b_3^2$

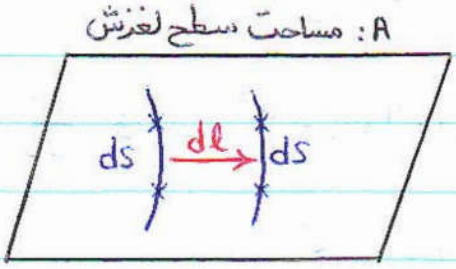
تجزیه صورت می گیرد .

تذکر. خود بردارهای برگرس b_2 و b_3 نیز باید بین دونقطه‌ی ماری باشد. ممکن است در صفحات

موسسه مواد شریف

دیگر این اتفاق رخ دهد.

نیروی وارد برخط نابجائی در تنش اعمالی:



فرض: المان نابجائی ds تحت تنش اعمالی τ

باندازه‌ی dl حرکت کرده است:

اگر ds کل صفحهٔ A را جاروکند، جابجائی دوصفحه نسبت به هم باندازه‌ی b است.

$$\Rightarrow \text{نیروی روی سطح لغزش} = \tau A$$

$$\text{جابجائی} = \frac{ds\,dl}{A}.b \qquad \text{(علت ؛)}$$

اگر ds کل صفحه‌ی A را جاروکند، دوصفحه نسبت به هم باندازه‌ی b می لغزند.

اگر ds باندازه‌ی dA حرکت کند، دوصفحه باندازه‌ی کسری از b نسبت به هم خواهند لغزید. $dA = ds \times dl$

$$A \leftrightarrow b \qquad \Rightarrow x = \frac{dA}{A} b$$
$$dA \leftrightarrow x$$

$\vec{b}$ $\vec{dl}$

سطح لغزش (A) ⊥ (ds: عمود بر صفحه است)

$$\Rightarrow W = \tau A \frac{dl\,ds}{A} b = \tau\, ds\, dl\, b$$

$$\Rightarrow F = \frac{\tau\, ds\, dl\, b}{ds} = \tau\, dl\, b$$: انرژی وارد بر واحد طول خط نابجائی

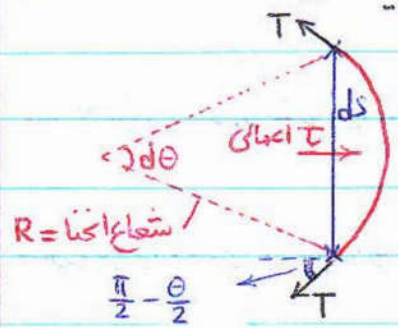
موسسه مواد شریف

ازلحاظ دیمانسیونی نیز صحیح است : $f = \tau b$ نیروی وارد برواحد طول $\Rightarrow$

جهت این نیرو عمود برخط نابجائی است زیرا حرکت نابجائی درجهت عمود برخط نابجائی است.

کشش خطی نابجائی :

یک خط نابجائی درنظر می گیریم . انرژی الاستیک برواحد طول آن αGb^2 است . اگردو انتهای خط نابجائی بسته نباشد ، آنقدر طول آن کاهش می یابد تا اینکه ازبین برود . زیرا وجود نابجائی ، انرژی راافزایش می دهد . اگر دراثر اعمال تنش ، طول نابجائی زیادشود ، نیروئی در جهت عکس تنش اعمالی به نابجائی وارد می شود تا طول آن را min کند . مانند کشش سطحی مایعات . بعبارتی : عکس العمل در برابر افزایش طول ویا افزایش انرژی .



τb : نیروی واردبر واحدطول نابجائی

نیروی واردبر طول ds : $\tau b ds$

دونیروی T تمایل داردکه طول زیادشده‌ی نابجائی راکم کند :

$$\sum F_x = 0 \quad \Rightarrow \quad 2T \frac{d\theta}{2} = \tau b\, ds = \tau b R d\theta$$

موسسه مواد شریف

$$\Rightarrow T = \tau . b . R \qquad \Rightarrow R = \frac{T}{\tau b}$$

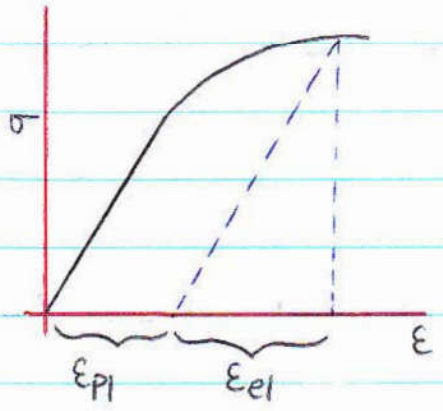
اما T مشخص نیست. T را تعریف می‌کنیم: $T = \alpha G b^2$

یعنی: افزایش انرژی بازای افزایش واحد طول [انرژی برواحد طول = نیرو]

افزایش طول نابجائی ← افزایش انرژی ← برواحدطول ← کشش خطی

$$\Rightarrow R = \frac{\alpha G b}{\tau}$$

با حذف تنش اعمالی، T موجب می‌شود که این تغییر طول نابجائی به حالت اول برگردد. این حالت الاستیک است. اگر از حد الاستیک بگذریم، میزان مربوط به الاستیک برگشته و تغییر طول پلاستیک باقی می‌ماند. (به شرط حذف τ اعمالی)



حد الاستیک را از روابط ریاضی نمی‌توان بدست آورد اما بطور تقریبی، وقتی به نیم دایره رسید، حد الاستیک است.

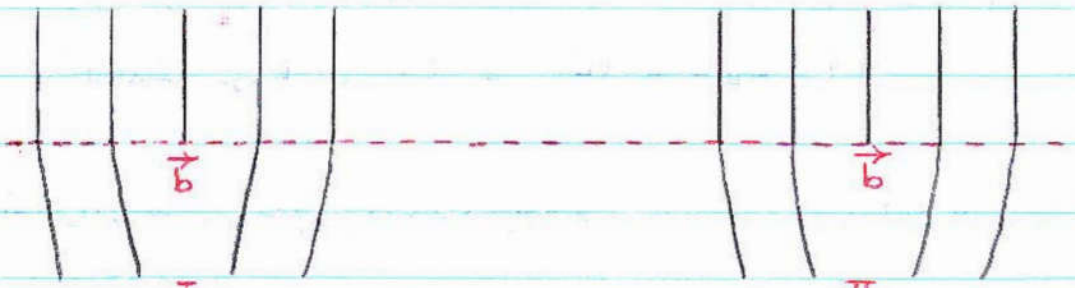
در این منحنی، در واقع علت اینکه ε_{el} داریم (مقدار تغییر طولی که با حذف نیروی اعمالی برمی‌گردد) به همان کشش خطی نابجائی مربوط می‌باشد.

موسسه مواد شریف

نیروبین دونابجائی :

چرابین دونابجائی نیرو وجود دارد ؟

حالت اول . دونابجائی با وضعیت زیر را در نظر می‌گیریم . این دونابجائی خیلی ازهم دور هستند.



$$E_I = E_{II} = \alpha G b^2$$

$$\Rightarrow \quad E_{total} = E_{sys.} = 2\alpha G b^2$$

اگر قرار باشد دونابجائی به هم نزدیک شوند تا اینکه به هم برسند درنتیجه یک نابجائی خواهیم

داشت با بردار برگرس $2b$. دراین حالت انرژی سیستم برابر است با :

$$E^*_{total} = E^*_{sys.} = 4\alpha G b^2$$

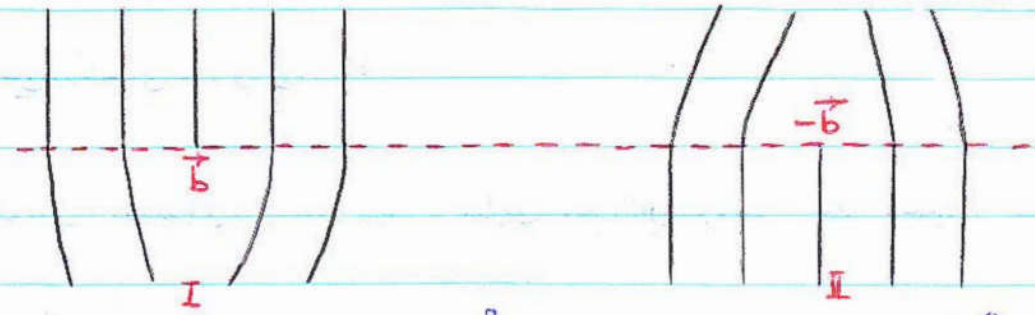
چون انرژی سیستم زیاد شده است (دوبرابر) درنتیجه این اتفاق نمی‌افتد و این دونابجائی یکدیگر

را دفع می‌کنند.

حالت دوم : دونابجائی با وضعیت زیر در نظر می‌گیریم و با فرض نزدیک شدنشان به هم، انرژی

موسسه مواد شریف

آن‌ها را با هم مقایسه می‌کنیم :



$$E_I = E_{II} = \alpha G b^2 \quad \Rightarrow E_{total} = E_{sys.} = 2\alpha G b^2$$

اگر این دو نابجائی به هم نزدیک شوند ، عیب خطی از بین می‌رود و شبکهٔ اتمی کامل می‌شود

وچون $b=0$ است در نتیجه : $E^*_{total} = E^*_{sys.} = 0$

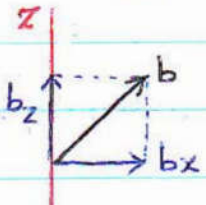
یعنی انرژی سیستم کاهش یافته است بنابراین ، این دو نابجائی همدیگر را جذب می‌کنند .

در نتیجه ، نیروی جاذبه و دافعه بین دو نابجائی وجود دارد . بعبارتی بین دو میدان تنش اثراتی بر روی هم ایجاد می‌شود .

یک نابجائی با طول بینهایت و منطبق بر محور z در نظر می‌گیریم ؛ نیرو بصورت زیر می‌شود :

$$F = -(\sigma_{xy} b_x + \sigma_{yz} b_z)\hat{i} + (\underbrace{\sigma_{xx} b_x + \sigma_{xz} b_z}_{\text{تابع نیرو بر واحد طول}})\hat{j}$$

میدان تنش شش مؤلفه دارد : σ_{xx} ، σ_{yy} ، σ_{zz} ، σ_{xy} ، σ_{xz} ، σ_{yz}



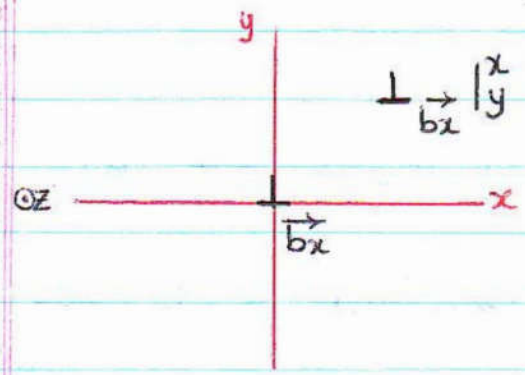
چون خط نابجائی در جهت z طول بینهایت دارد در نتیجه تغییر طول در جهت z برای آن معنا ندارد و F در این جهت مؤلفه‌ای ندارد .

موسسه مواد شریف

امّا برای نیروبین دونابجائی :

یکی از نابجائی ها را منبع تنش درنظر می گیریم و دیگری را نسبت به آن می سنجیم . خط نابجائی را بر محور z درنظر می گیریم .

نیروبین دونابجائی پله ای :



این دونابجائی پله ای موازی هم هستند و بردار برگرس های موازی دارند . ≡ ساده ترین حالت.

نابجائی پله ای در اطراف خودش میدان تنش اعمال می کند :

$$\sigma_{xx}=\sigma_x=-\frac{Gb}{2\pi(1-\nu)}\,y\,\frac{3x^2+y^2}{(x^2+y^2)^2} \qquad \sigma_{zz}=\sigma_z=\nu(\sigma_x+\sigma_y)$$

$$\sigma_{yy}=\sigma_y=\frac{Gb}{2\pi(1-\nu)}\,x\,\frac{x^2-y^2}{(x^2+y^2)^2}$$

$$\sigma_{xy}=\tau_{xy}=\frac{Gb}{2\pi(1-\nu)}\,\frac{x^2-y^2}{(x^2+y^2)^2}$$

چون بردار برگرس فقط در راستای x مؤلفه دارد ، در رابطه ی صفحه ی قبل $b_z=0$ است .

$$F_x=-(\sigma_{xy}\,b_x)\hat{i}=-\frac{Gb^2}{2\pi(1-\nu)}\,x\,\frac{x^2-y^2}{(x^2+y^2)^2}$$

$$F_y=(\sigma_{xx}\,b_x)\hat{j}=-\frac{Gb^2}{2\pi(1-\nu)}\,y\,\frac{3x^2+y^2}{(x^2+y^2)^2}$$

موسسه مواد شریف

سطح لغزش ≡ صفحه‌ی zx . (خط نابجائی در جهت z و بردار برگرس در جهت x)

Fy : عمود بر سطح لغزش ← به صعود نابجائی کمک می‌کند.

Fx : روی سطح لغزش ← به لغزش نابجائی کمک می‌کند.

$$Fx = -\frac{Gb^2}{2\pi(1-\nu)} \times \frac{x^2-y^2}{(x^2+y^2)^2} \quad *$$

اگر در کل ، علامت نیرو منفی شد ، نیرو دافعه و اگر مثبت شد نیرو از نوع جاذبه است .

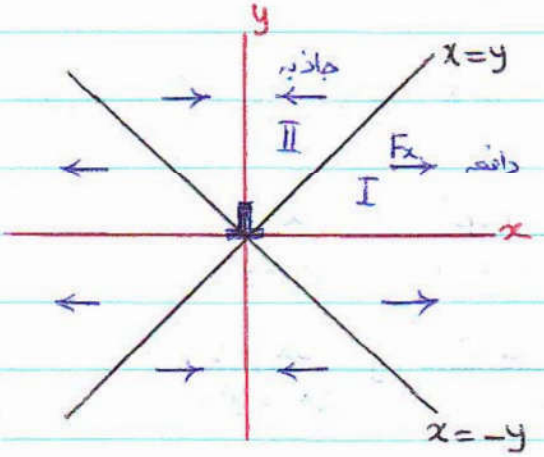
علامت Fx به سه عامل بستگی دارد: b^2 ، x و x^2-y^2 .

اگر یکی از بردار برگرس ها $b+$ و دیگری $b-$ باشد: $(-b)(b) = -b^2 \equiv b^2$ ؛ یعنی

b^2 منفی خواهد شد . حالات دیگر: $(b)(b) = b^2$ $\quad (-b)(-b) = b^2$

$x = y$ or $x = 0$ $\Rightarrow Fx = 0$ ← تعادل

فرض : $x > 0$ ، $b^2 > 0$ (دو نابجائی همنام) پس : $x > y : F+$ $\quad x < y : F-$



اگر علامت منفی در رابطه‌ی * را در نظر نگیریم :

در این حالت اگر در مناطق دافعه (I) باشیم دو

نابجائی تا بینهایت از هم دور می‌شوند و اگر در

موسسه مواد شریف

مناطق جاذبه باشیم (II) دونابجائی همدیگر را جذب می‌کنند و نابجائی دوم (غیر از منبع تنش)

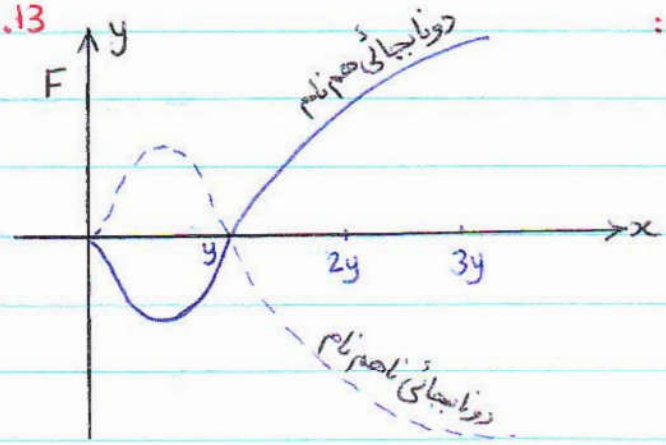
آنقدر جذب منبع شده تا به محور y برسد و به تعادل نیز برسد.

در همین حالت اگر دونابجائی ناهمنام باشند ($b^2<0$ شود) آنگاه در صفحهٔ x-y

مشاهده می‌شود که تعادل تنها در خطوط $y=|x|$ برقرار می‌شود؛ یعنی در زاویه‌ی 45°.

یعنی یکسری آرایش نابجائی در این جهت بوجود می‌آید که اساس مرزدانه‌ی فری را تشکیل می‌دهد.

رسم نمودار F برحسب x و y : 85.12.13



نابجائی در شبکه‌ی F.C.C :

کوچکترین بردار برگرس در f.c.c ، $\frac{a}{2}\langle 110\rangle$ است. که کمترین انرژی را داشته و

متداول‌ترین نابجائی در این سیستم است که می‌تواند بلغزد. (سیستم لغزش فشرده $\frac{a}{2}\langle 110\rangle\{111\}$)

نابجائی پله‌ای :

اگر بردار برگرس $\frac{a}{2}[110]$ را در نظر بگیریم، نیم صفحهٔ اضافی و هم چنین دیگر صفحاتی

موسسه مواد شریف

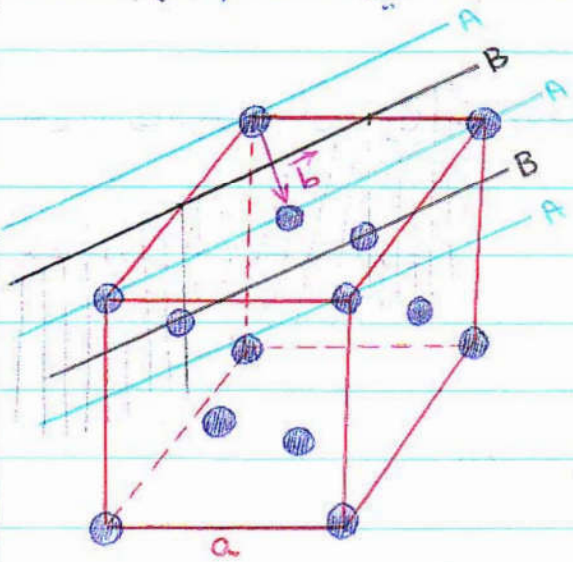
که بلور را تشکیل می دهند دارای اندیس (110) هستند. ملاحظه می شود که بردار برگرس فوق

براین صفحات عمود است.

درکریستالوگرافی دیدیم که: اگر یک صفحه دارای نقاط مادی باشد، می توان کل بلور را از چیدن

این صفحات بصورت موازی ایجاد کرد. در Unitcell زیر صفحات {110} موازی نشان

داده شده است:



$\vec{b} = \frac{a}{2}[110]$

صفحات سری ▬ ازنوع (110) است.

صفحات سری ▬ هم ازنوع (110) است و

هردو سری دارای نقاط مادی هستند. واز تکرار هردو سری

کل بلور متشکل می گردد. اگر سری اول را A بنامیم، سری دوم B خواهد بود زیرا موقعیت

اتمی یکسانی ندارند. بنابراین کل بلور از چیدن صفحات (110) بصورت ...ABAB... ایجاد

می شود. بردار $\vec{b}$، برداریست که از رأس مکعب به وسط وجه می آید و برهردو سری صفحات

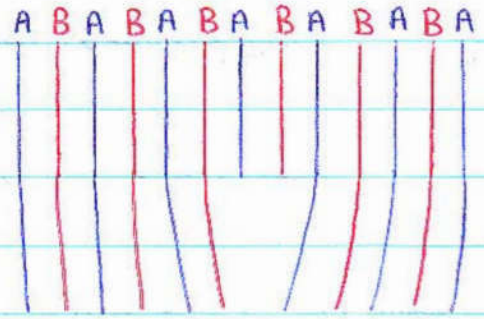
A و B نیز عمود است چون اندیس های یکسانی دارند. (110) صفحهٔ قطری مکعب است

و صفحهٔ (111) صفحهٔ قطر اصلی مکعب.

موسسه مواد شریف

برای تشکیل نابجائی از نوع $\frac{a}{2}\langle 110\rangle$ باید دونیم صفحه داشت. یکی از نوع A و دیگری از نوع B.

وچون دونابجائی نمی‌توانند کنارهم باقی بمانند، ازهم دور می‌شوند.



تذکر. واضح است که اتم های سطح A،

با اتم های سطح B در یک صفحه نیستند.

دورشدن این دونابجائی به معنی تجزیه شدنشان نیز می‌باشد:

$$\frac{a}{2}[110] \longrightarrow \frac{a}{6}[121] + \frac{a}{6}[21\bar{1}]$$

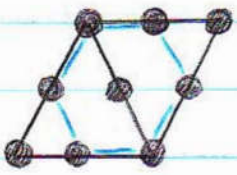
$a^2/2$ ↓ $a^2/3$

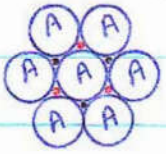
هرسه‌ی این نابجائی ها در صفحه‌ی (111) هستند. بدین معنی که بکسر بردار روی صفحهٔ (111)

و سر دیگر روی لایه‌ی (111) بعدی است. بعبارت دیگر، این بردارها بین دوصفحه ازنوع

(111) واقع شده‌اند. شبکه‌ی F.C.C از چیدن ...ABCABC... صفحات (111) ایجاد می‌شود.

یا A-A ـ ویا B-B، ویا C-C است.





B •

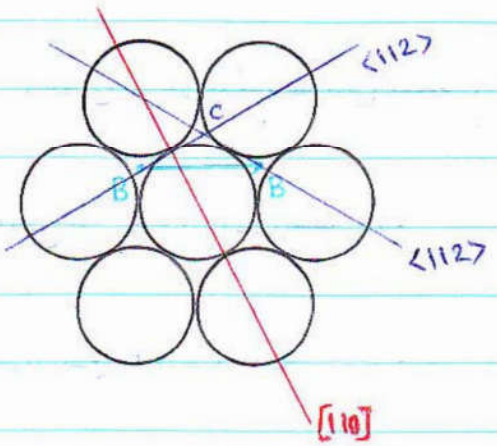
C •

$\vec{BB} \Rightarrow \vec{BC} + \vec{CB}$ $\quad \vec{BB} = \frac{a}{2}\langle 110\rangle$ $\quad \vec{BC} = \frac{a}{6}\langle 121\rangle$

$\vec{CB} = \frac{a}{6}\langle 21\bar{1}\rangle$

موسسه مواد شریف

وضعیت بردارهای [110] و [112] درشکل زیرنشان داده شده است.



$\vec{BB} = \frac{a}{2}\langle 110\rangle$

بردارهائیکه ازوسط سه اتم می گذرند

[111] بوده وبردارهائیکه ازوسط دو

اتم ودوجای خالی گذشته اند، [112] هستند. ازشکل هم دیده می شودکه:

$$\vec{BB} = \vec{BC} + \vec{CB}$$

نابجائی های $\vec{BC}$ و $\vec{CB}$ بااندیس های $\frac{a}{6}[121]$ و $\frac{a}{6}[2\bar{1}1]$، دونابجائی

جزئی هستندکه درادامه به آنها توضیح می دهیم.

درحرکت نابجائی، اگراتم به همان مکان اصلی خود برود نابجائی اصلی است ولی اگراین طورنشد،

نابجائی جزئی است به نام نابجائی شوکلی shocklay.

مثلاً اتم B اول باید به موقعیت C رفته وبعد دوباره به B برود $(\vec{BB})$ درنتیجه، اتم B جای

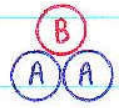
اتم C راگرفته است. درغیراینصورت اتم B برای اینکه بخواهد به مکان مشابه B برود باید

ازروی اتم A رد شود که این کارصورت نمی گیرد زیرا مسیر راحت تر و با انرژی کمتراین است که اول به

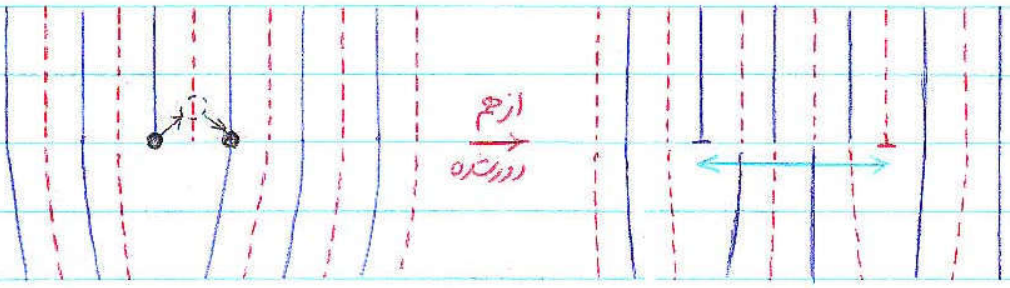
موسسه مواد شریف

C برود و بجای B . B و C نیز در دولایه‌ی (111) بصورت پشت سرهم قرار دارند . اتم B برای رسیدن به C بصورت زیگزاگ حرکت می‌کند .

در نتیجه نابجائی $\langle 110 \rangle \frac{a}{2}$ همیشه تجزیه شده و دو نابجائی جزئی نیز باهم حرکت می‌کنند . به همین دلیل است که صفحات (111) روی هم نمی‌لغزند زیرا برای لغزیدن باید ازهم باز شده یا فاصله بگیرند و این اتفاق رخ نمی‌دهد و لغزش از لایه‌لای اتم‌ها صورت می‌گیرد .



رفتن اتم B از ، از وسط A اتفاق می‌افتد :



بین دو نابجائی فوق ، صفحات رو سری هم با یکدیگر فرق می‌کنند هم‌چنین در یک صفحه هم نیستند . در نتیجه می‌توان حد فاصل این دو نابجائی جزئی یک صفحه‌ای در نظر گرفت به نام سطح خطای چیده شدن . این عیب یک عیب سطحی است . در واقع ادامه‌ی اتم‌های A ، اتم‌های B قرار گرفته است . یکی از نابجائی‌ها عیب را بوجود می‌آورد و دیگری آنرا رفع می‌کند . بنابراین

بین دو نابجائی شکله ، سطح خطای چیده شدن وجود دارد .

موسسه مواد شریف

$$\frac{a}{2}[110] \rightarrow \frac{a}{6}[211] + \frac{a}{6}[12\bar{1}]$$

سطح خطای چیده شدن

ایجاد شدن این سطح خود نیاز به انرژی دارد (انرژی سطحی) ولی از طرف دیگر موجب کاهش انرژی سیستم نیز می شود. بنابراین:

کاهش انرژی ← وجود نیروی دافعه بین دو نابجائی

افزایش انرژی ← ایجاد سطح خطای چیده شدن

در نتیجه باید حالت تعادلی وجود داشته باشد. یعنی فاصلهٔ تعادلی بین دو نابجائی. پس بین دو نابجائی فاصلهٔ ثابتی وجود دارد که در این حالت، انرژی سیستم min است.

نیروی بین این دو نابجائی: $F = \frac{G(b_1 \cdot b_2)}{2\pi d}$ بر واحد طول

(ضرب داخلی، فاصله)

انرژی بر واحد سطح خطای چیده شدن: γ ← $\gamma = F$

$$\gamma = \frac{G(b_1 \cdot b_2)}{2\pi d} \qquad d = \frac{G(b_1 \cdot b_2)}{2\pi\gamma}$$

در مس، γ بزرگتر است از γ در Al. در نتیجه فاصلهٔ دو نابجائی تشکیله در Al بیشتر است.

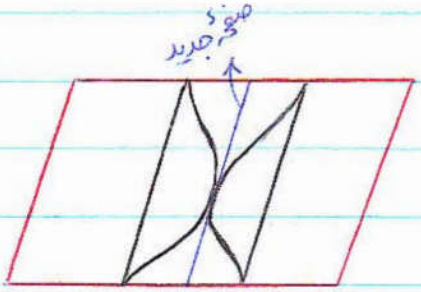
γ بستگی به فشردگی و... دارد.

موسسه مواد شریف

زوج نابجائی شکله ، همیشه از نوع پله‌ای است؛ حتی اگر نابجائی اول پیچی باشد.

بنابراین اگر نابجائی پیچی تجزیه شد دیگر نمی‌تواند لغزش تقاطعی انجام دهد زیرا نابجائی‌های جدید پله‌ای هستند.

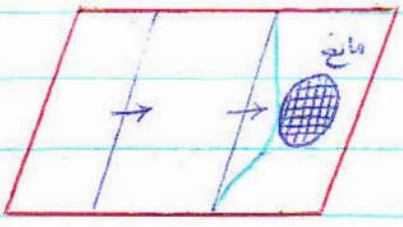
شرط اینکه نابجائی‌های شکله سطح لغزش خود را تغییر دهند این است که ابتدا ترکیب شده و نابجائی پیچی ایجاد کند و بعد سطح لغزش خود را عوض کند و دوباره تجزیه شود.



این فرایند در کل انرژی را افزایش می‌دهد. امّا سؤال اینجاست که

اگر انرژی را زیاد می‌کند پس چرا این اتفاق می‌افتد و کی می‌افتد؟

جواب این است که وقتی نابجائی به مانعی می‌رسد برای ادامهٔ حرکت خود نیاز دارد که صفحهٔ لغزش خود را عوض کند. هم چنین وقتی نابجائی به مانع می‌رسد ما نیاز داریم نیروی بیشتری اعمال کنیم. در نتیجه افزایش انرژی این فرایند نیز جبران می‌شود.



موسسه مواد شریف

در شبکه‌ی F.c.c یک چهار وجهی به نام Thompson تعریف می‌کنند و در این چهار وجهی انواع واکنش‌ها را می‌توان مشاهده کرد.

این چهار وجهی از چهار صفحه‌ی متساوی الاضلاع (صفحات اوکتاهدرال) یا {111} تشکیل می‌شود. هر چهار وجه این چهار وجهی با هریک از صفحات {111} موازی است. چون اضلاع این مثلث متساوی الاضلاع موازی جهات لغزش (<110>) است در نتیجه مشخصه‌ی این چهار وجهی این است که:

وجوه موازی صفحات لغزش و یال‌ها موازی جهات لغزش است. در نتیجه این چهار وجهی بیان کننده‌ی کلیه‌ی سیستم‌های لغزش در F.c.c است.

اگر از هر رأس عمودی به وجه مقابل رسم کنیم، پای عمود در مرکز ثقل وجه واقع خواهد شد. پای عمودها را α، β، γ و δ می‌نامیم.

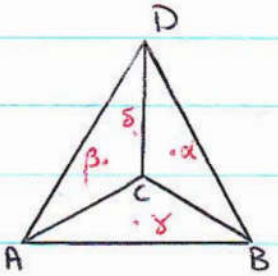
بردار برگرسی که موازی هریک از یال‌های AB، BC، BD و ... که 6 تا هستند باشد، یک نابجایی کامل است. بعبارتی هر دو حرف به کار رفته برای بردار آن حروف بزرگ هستند.

هر نابجایی که بردار برگرس آن شامل یک حرف بزرگ و یک حرف کوچک باشد ($\vec{AS}$) یک نابجایی جزئی است.

موسسه مواد شریف

بردار برگرس لزومی ندارد روی این خطوط واقع شود بلکه باید موازی آن باشد.

$$\frac{a}{2}[110] \rightarrow \frac{a}{6}[121] + \frac{a}{6}[21\bar{1}]$$



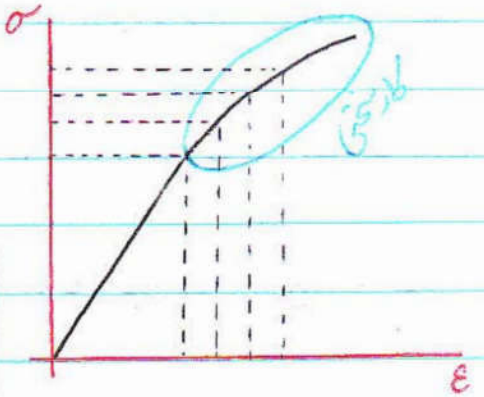
مثلاً

$\vec{AB}$	$\vec{AS}$	$\vec{SB}$	(ABC)
$\vec{AB}$	$\vec{A\gamma}$	$\vec{\gamma D}$	(ABD)

یعنی اینکه برای $\vec{AB}$ دوگونه تجزیه شدن وجود دارد زیرا $\vec{AB}$ فصل مشترک دوصفحه‌ی ABC و ABD است. درنتیجه می‌توان واکنش ها را پیش بینی کرد.

نابجائی جزئی فرانک : (Frank)

این نابجائی ازنوع غیرمتحرک است. این گونه نابجائی ها نیز مهم می باشند زیرا : اگر نابجائی های متحرک در طی لغزش خود که حرکت می کنند، به نابجائی های غیرمتحرک برسند، این نابجائی ها بعنوان مانع عمل می کنند و موجب کارسختی می شوند؛ یعنی اینکه، بابیشتر لغزیدن، بازای کرنش های یکسان، تنش بیشتری باید اعمال کرد. بعبارت دیگر کارسختی عبارتست از: موانع جلوی حرکت نابجائی و به دنبال آن، اعمال تنش های بعدی بیشتر.



نابجائی فرانک یک نابجائی پله‌ای است. سطح ناقص یا نیم صفحه‌ی اضافی ازنوع $\{111\}$ است. درنتیجه بردار

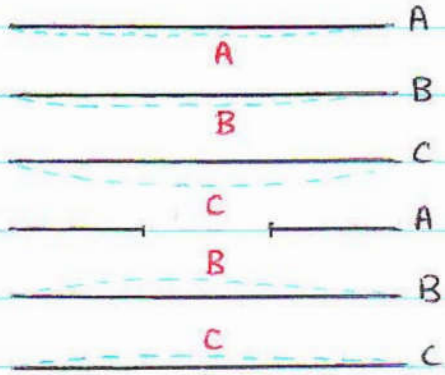
موسسه مواد شریف

برگرس آن در جهت ⟨111⟩ است.

از آنجاکه تکرار سطوح {111} در شبکه‌ی F.C.C ، ...ABCABCA... است، بردار برگرس این نابجائی ⟨111⟩ $\frac{a}{3}$ است. ($\frac{1}{3}$ قطر مکعب با طول : $\frac{a\sqrt{3}}{3}$)

دو حالت برای ایجاد نابجائی فرانک وجود دارد :

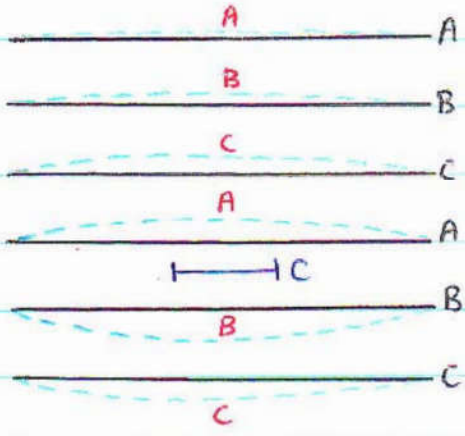
I . ناقص بودن یک صفحه :



در شکل صفحات {111} دیده می‌شود. بدلیل ناقص بودن یک نیم صفحه، در چیدن این صفحات که باید ...ABCABC... باشد، نقص وجود دارد و بصورت ...ABCBCA... درآمده است.

این نابجائی ، نابجائی فرانک ساده نام دارد.

II . یک نیم صفحه اضافه شود :



چون بین صفحه‌های A و B فقط برای موقعیت C جای وجود دارد پس نیم صفحه‌ی فوق اگر بین A و B واقع شود ، از نوع C است.

موسسه مواد شریف

در این مورد هم ترتیب صفحات به جای آنکه ... ABCABC ... شود، ... ABCA/C/BCA ... خواهد شد. این نابجائی، نابجائی فرانک دوتایی (dabble frank - DF) نام دارد. بردار برگرس هر

دو نوع نابجائی فرانک $\frac{a}{3}\langle 111\rangle$ است.

بردار برگرس نابجائی فرانک موازی ارتفاع های چهار وجهی Thompson است یعنی:

$$\vec{A\alpha}\ ,\ \vec{B\beta}\ ,\ \vec{C\gamma}\ ,\ \vec{D\delta}$$

بنابراین چهارنوع بردار برگرس نابجائی فرانک وجود دارد.

$$\frac{a}{3}[111] + \frac{a}{6}[11\bar{2}] \longrightarrow \frac{a}{2}[110]$$

فرانک — یک جزء نابجائی — نابجائی کامل

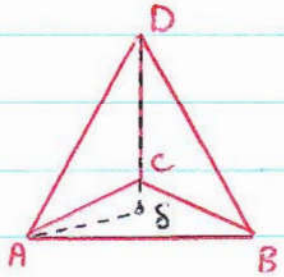
شکله

$$\frac{3a^2}{9} + \frac{6a^2}{36} = \frac{a^2}{2} \longrightarrow \frac{a^2}{2}$$

یعنی هیچ تغییری در انرژی حاصل نمی‌شود. اما نابجائی کامل فوق بلافاصله تجزیه می‌شود به

دو نابجائی جزئی شکلی: $\frac{a}{6}[2\bar{1}1] + \frac{a}{6}[12\bar{1}]$. یعنی دو نابجائی فرانک و شکله تبدیل می‌شود

به دو نابجائی دیگر.



$$\vec{A\delta} + \vec{\delta D} = \vec{AD}$$

نابجائی فرانک — نابجائی کامل

موسسه مواد شریف

برای اینکه دونابجائی فرانک به نابجائی کامل تبدیل شود، برای هرکدام سه حالت وجود دارد یعنی

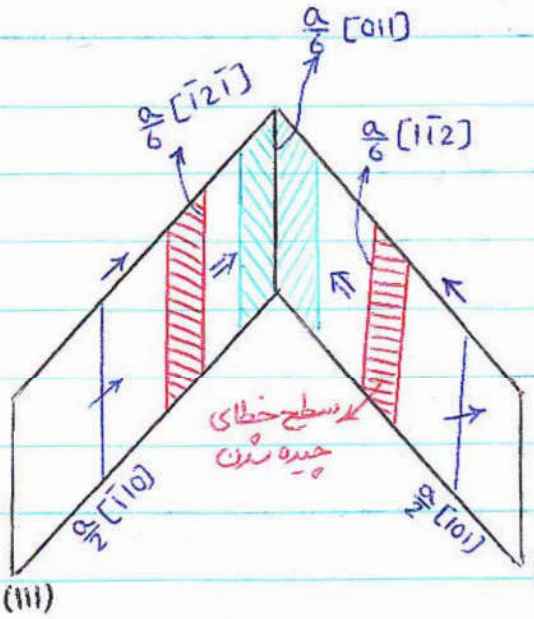
بعنوان مثال برای $\vec{\delta}C$ ، سه حالت $\vec{\delta}A$ ، $\vec{\delta}B$ و $\vec{\delta}D$ وجود دارد تا به یک نابجائی کامل مثل

$\vec{CB}$ تبدیل شود.

نابجائی فرانک نمی‌تواند حرکت کند زیرا بردار برگرس آن در جهت فشرده نبوده و عمود بر

جهت فشرده است.

نابجائی غیرمتحرک Lomer_cottrel :



این نابجائی از فصل مشترک دوصفحهٔ (111)

یعنی دونوع صفحه از صفحات {111} بوجود

می‌آید. مثلاً دونابجائی روی دو صفحهٔ زیر را

درنظر بگیرید :

$$(\bar{1}11): \frac{a}{2}[101] \rightarrow \frac{a}{6}[211] + \frac{a}{6}[1\bar{1}2]$$

$$(111): \frac{a}{2}[\bar{1}10] \rightarrow \frac{a}{6}[\bar{2}11] + \frac{a}{6}[\bar{1}2\bar{1}]$$

این دوزوج نابجائی دراثر تنش حرکت می‌کنند ودرفصل مشترک دوصفحه، دونابجائی جزئی

موسسه مواد شریف

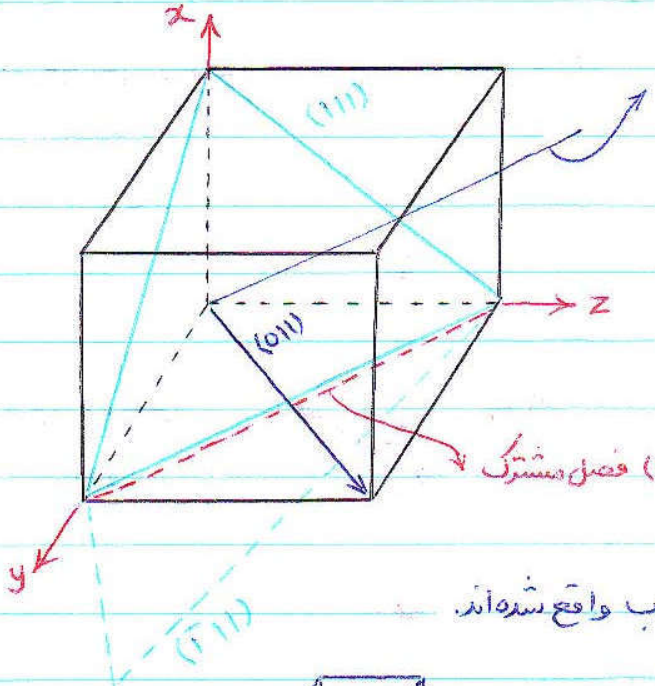
جلوئی به هم می رسند و با هم ترکیب می شوند . حاصل این ترکیب ، نابجائی کامل نخواهد بود .

$$\frac{a}{6}[1\bar{1}2] + \frac{a}{6}[\bar{1}2\bar{1}] \longrightarrow \frac{a}{6}[011]$$

$$\downarrow \frac{a^2}{3} \qquad \rightarrow \qquad \downarrow \frac{a^2}{18}$$

مشاهده می شود که انرژی بشدت کاهش یافته است . بنابراین دو نابجائی جلوئی بشدت همدیگر را جذب می کنند و این نابجائی را بوجود می آورد . در دو طرف فصل مشترک نیز سطح خطای چیده شدن وجود دارد .

قابل ذکر است که ، برخورد دو صفحه ی {111} در جهت <110> است . (جهت فصل مشترک)



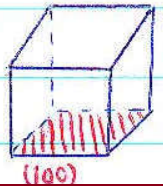
جهت نابجائی = فصل مشترک

$[0\bar{1}1]$

بردار برگرس $\rightarrow$ $[011]$

(1$\bar{1}$1) و (111) فصل مشترک

خط نابجائی و بردار برگرس روی وجه مکعب واقع شده اند .



روی وجه (100) .

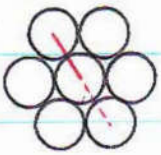
موسسه مواد شریف

نابجائی‌های دیگر نمی‌توانند به این منطقه‌ی فصل مشترک نزدیک شوند ، درنتیجه مانعی سرراه حرکت نابجائی های دیگر به حساب می‌آیند . درنتیجه در کارسختی اهمیت دارد .

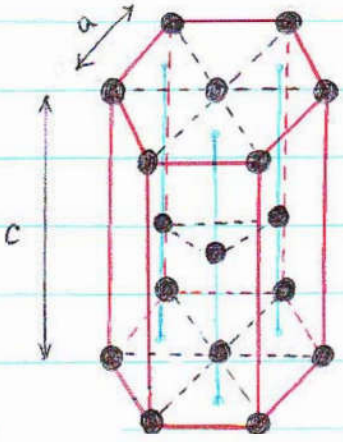
تذکر . همیشه امکان تشکیل نابجائی lomer وجود ندارد بلکه فقط زمانیکه انرژی بشدت کاهش یابد امکان تشکیل آن وجوددارد .

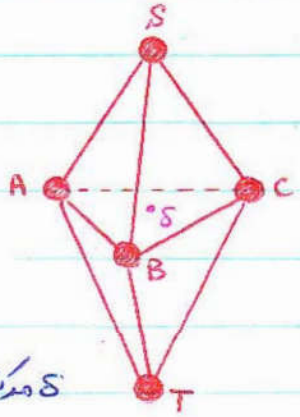
نابجائی درشبکه‌ی h.c.p :

در h.c.p ، سطوح لغزش $\{0001\}$ وجهات لغزش $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ است. بردار برگرس نیز $\frac{a}{3}\langle 11\bar{2}0 \rangle$ می‌باشد .



دراینجاهم می‌توان چهاروجهی Thompson درنظر گرفت .





روچهاروجهی مماس :

δ مرکزثقل ABC است .

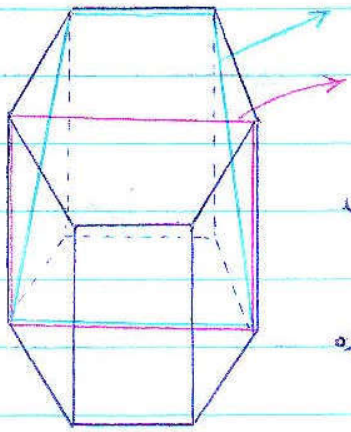
درجدول زیر انواع نابجائی در h.c.p آورده‌شده است :

موسسه مواد شریف

نوع نابجائی	AB	ST	AS
جهت	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	$\langle 000\bar{1} \rangle$	$\langle \bar{1}100 \rangle$
اندازه‌ی بردار	a	c	$\frac{a}{\sqrt{3}}$
انرژی (متناسب است با)	a^2	$c^2 = \frac{8}{3}a^2$	$\frac{a^2}{3}$

معروفترین نابجائی در h.c.p ، AB است . AS از نوع نابجائی شکله است.

در دمای معمولی ، لغزش در h.c.p روی سطوح $\{0001\}$ و جهت $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ است. این سطوح باهم موازی هستند و با یکدیگر تلاقی ندارند. امّا در دمای بالا، یکسری سیستم های لغزش دیگر اضافه می شوند . این سیستم‌ها شامل سطوح منشوری و هرمی است :



سطوح هرمی $\{10\bar{1}1\}\langle 11\bar{2}0 \rangle$

سطح منشوری $\{10\bar{1}0\}\langle 11\bar{2}0 \rangle$

در h.c.p اثر دما در لغزش خیلی بیشتر از F.c.c است

زیرا در اثر افزایش دما به سیستم های لغزش h.c.p افزوده می شود . هم‌چنین در دمای بالا سیستم های لغزش در h.c.p متقاطع می شوند در نتیجه امکان حرکت نابجائی نیز بیشتر می شود .

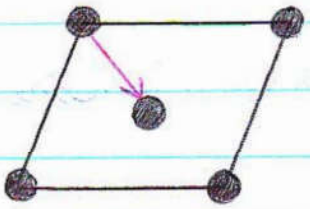
موسسه مواد شریف

حرکت نابجائی نیاز به یک min تنش (τ_{cr}) دارد ؛ که این τ را σ فراهم می‌کند.

افزایش دما، τ_{cr} را کاهش می‌دهد و در σ های کمتر نیز لغزش انجام می‌شود.

85.12.20

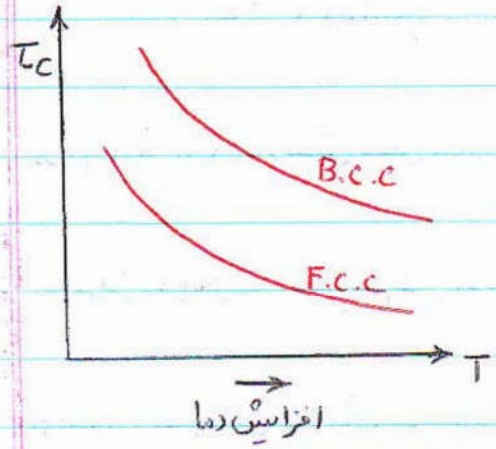
نابجائی در شبکه‌ی B.C.C :



$\vec{b} = \frac{a}{2}\langle 111\rangle$ $\{110\}\langle 111\rangle$

در B.C.C مکانیزم دیگری برای تغییر مرز پلاستیک وجود دارد. این مکانیزم، تشکیل سطوح دوقلوی است.

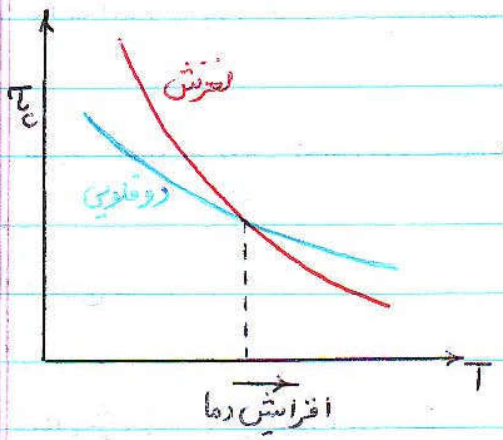
τ_c : تنش بحرانی روی سطح لغزش . یعنی min تنشی که لازم است تا نابجائی حرکت کند. این تنش برای صفحه‌ای خاص است. τ_{Yield} (تنش تسلیم) برای یک ماده است. τ را نیز تنش اعمالی تعریف می‌کنیم. در مقایسه‌ی B.C.C و F.C.C می‌توان گفت برای لغزش تنش بحرانی B.C.C از F.C.C بزرگتر است. در نتیجه F.C.C راحت‌تر می‌لغزد و تغییر شکل می‌دهد.



اما در مورد شبکه‌ی B.C.C می‌توان گفت که، در دماهای پائین سطوح دوقلوی فعال‌تر هستند

موسسه مواد شریف

زیرا τ_c سطوح دوقلویی کمتر از τ_c برای لغزش است.

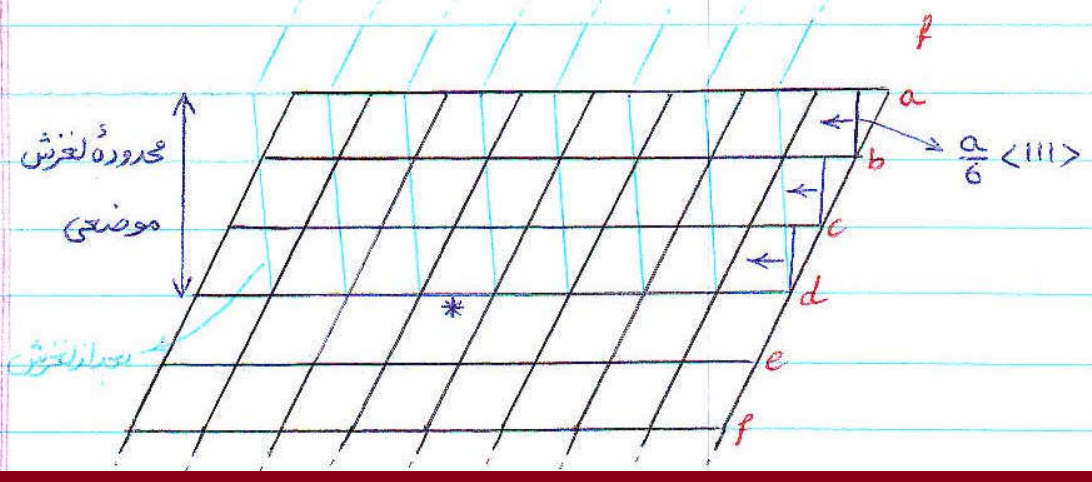


امّا اینطور نیست که در دمای پائین اصلاً لغزشی انجام نشود.

همچنین در اینجا، منظور از دوقلویی، دوقلویی مکانیکی است زیرا اعمال نیرو داریم.

سیستم تشکیل سطوح دوقلویی عبارتست از: $\langle 111 \rangle \{112\}$. سطوح دوقلویی در اثر تغییر شکل یا لغزش موضعی بوجود می آید. این دوقلویی از لغزش موضعی نابجائی $\frac{a}{6}\langle 111 \rangle$ روی سطح $\{112\}$ ایجاد می شود. تکرار سطوح $\{112\}$ در b.c.c بصورت تکرار 6 تایی ... abcdefabcdef ... است. یعنی 6 تا صفحه ی $\{112\}$ شبکه ی b.c.c را می سازد.

به همین دلیل است که نابجائی فوق دارای ضریب $\frac{a}{6}$ است. در شکل زیر مشاهده می شود که در یک قسمت از بلور، سطوح $\{112\}$ حرکت کرده و در این سطح، آرایش اتم ها به هم خورده است.



موسسه مواد شریف

علت اینکه برخی از این سطوح حرکت می‌کنند این است که 6 نوع سطح (112) داریم که لغزش یکسانی ندارند. مساحت سطح دوقلویی (محدودهٔ لغزش موضعی) بستگی به تعداد نابجائی‌ها دارد.

$$\frac{a}{2}[111] \rightarrow \frac{a}{3}[111] + \frac{a}{6}[111] \quad , \quad \frac{a}{3}[111] \rightarrow \frac{a}{6}[111] + \frac{a}{6}[111]$$

$$\Rightarrow \frac{a}{2}[111] \rightarrow \frac{a}{6}[111] + \frac{a}{6}[111] + \frac{a}{6}[111]$$

سطح لغزش $\frac{a}{6}[111]$ ، (112) است. در لغزش نابجائی، همهٔ اتم‌ها با اندازه‌ی $\vec{b}$ حرکت می‌کنند ولی در دوقلویی، میزان حرکت بستگی به فاصله از خط * دارد.

برخورد نابجائی‌ها:

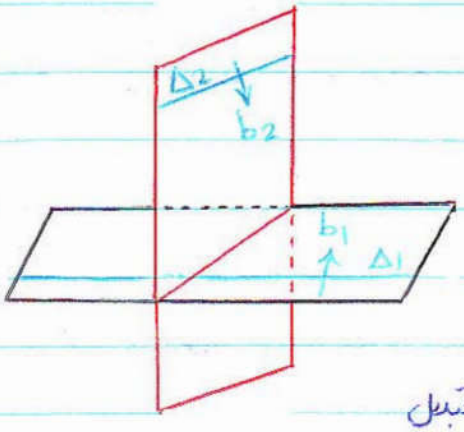
در شبکه بر اساس نقصی که در طول انجماد بوجود می‌آید می‌توان بینهایت نابجائی تعریف کرد که هرکدام هم سطح لغزشی دارند. ممکن است که برخی از این نابجائی‌ها حرکت نکنند. در نتیجه در حرکت نابجائی، سر راه، نابجائی‌های دیگری نیز وجود دارند. بنابراین نابجائی در حرکت خود مجبور است با نابجائی‌های دیگر برخورد کند. این یک اصل است.

چه فرقی بین برخورد نابجائی و واکنش نابجائی وجود دارد؟

موسسه مواد شریف

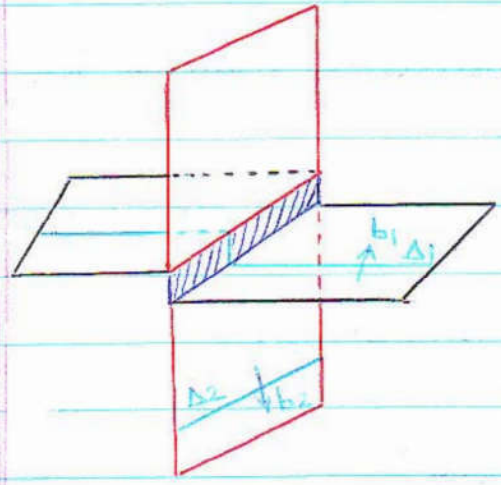
واکنش دونابجائی معمولاً روی یک خط انجام می شود یعنی دوخط نابجائی دریک خط همدیگر را قطع می کنند . امّا در برخورد دونابجائی ، آن دو همدیگر را دریک نقطه قطع می کنند . البته معمولاً این طور می باشد . هم چنین ممکن است واکنش هم دریک نقطه یعنی محل تلاقی دونابجائی درحالتی که یک نقطه است ، انجام شود . زاویه ی بین سطوحی که نابجائی هایشان باهم برخورد می کند ، نامشخص است . امّا ما حالت خاص زیر را درنظر می گیریم . یعنی زاویه ی 90 درجه :

دونابجائی پله ای زیر را درنظر می گیریم :



$$\begin{cases} b_1 \perp \Delta_1 \\ b_2 \perp \Delta_2 \end{cases}$$

بعد از لغزش نابجائی دوّم شکل بالا به شکل زیر تبدیل می شود :



ملاحظه می شود درخط نابجائی Δ_1 ، یک Jog ایجاد شده است .

اگر $b_2 \parallel \Delta_1$ باشد ، چون جابجائی اتم ها در راستای b_2 است درخط Δ_1 تغییری ایجاد نمی شود . امّا اگر $b_2 \perp \Delta_1$ باشد چون جابجائی اتم ها

موسسه مواد شریف

در راستای b_2 است در خط Δ_1 شکستگی ایجاد می‌شود. در شکل قبلی حالت $b_2 \perp \Delta_1$ را داریم زیرا در Δ_1 شکستگی ایجاد شده است. (Jog) نتیجه:

اگر دو نابجائی همدیگر را قطع کنند بسته به موقعیت b_1 و Δ_2 ؛ b_2 و Δ_1 ، Jog یا ایجاد می‌شود و یا نمی‌شود. Jog ایجاد می‌شود $\rightarrow$ $\Delta_2 \perp b_1$ or $\Delta_1 \perp b_2$

Jog ایجاد نمی‌شود $\rightarrow$ $\Delta_2 \parallel b_1$ or $\Delta_1 \parallel b_2$

در شکل بالا، Jog برای Δ_1 ایجاد شده است. اما اینکه نوع Jog بوجود آمده پیچی است یا پله‌ای را b_1 تعیین می‌کند.

$b_1 \parallel b_2 \rightarrow$ Jog پیچی است $b_1 \perp b_2 \rightarrow$ Jog پله‌ای است

برای ما مهم این است که Jog بوجود آمده بعد از برخورد می‌تواند حرکت کند یا نه؟

Jog ایجاد شده روی نابجائی پله‌ای می‌تواند پله‌ای یا پیچی باشد.

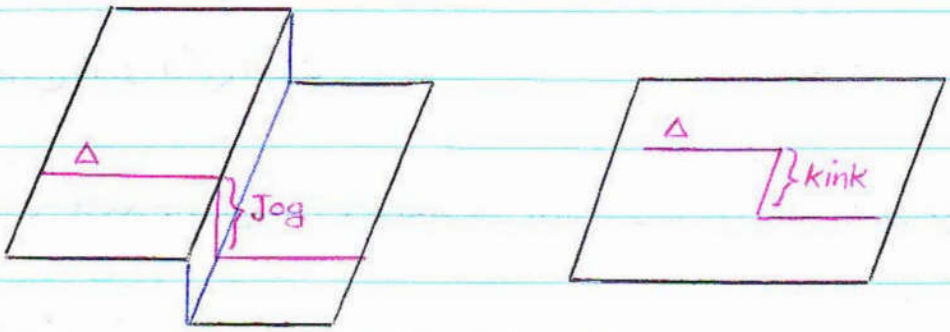
Jog ایجاد شده روی نابجائی پیچی حتماً پله‌ای است:

$b_2 \perp \Delta_1$ (شرط ایجاد Jog) $b_1 \parallel \Delta_1$ (نابجائی پیچی)

$\rightarrow b_1 \perp b_2 \Rightarrow$ پله‌ای

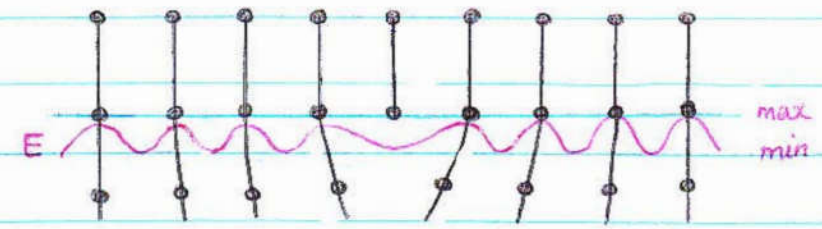
موسسه مواد شریف

تذکر. زمانی شکستگی روی خط نابجائی Jog است که صفحهٔ Jog با صفحهٔ خط نابجائی متعامد باشد، درغیراینصورت یعنی صفحهٔ Jog وصفحهٔ خط نابجائی اگر هم صفحه یکسان باشد، Jog نداریم بلکه kink داریم.



درنزدیکی صفرمطلق kink ها هم حرکت می‌کنند. درنتیجه انرژی لازم برای حرکتشان کم است. امّا نتیجهٔ حرکت kink چیست؟

قبلاً انرژی برواحدطول را αGb^2 بدست آوردیم واین مقدار راثابت گرفتیم. هم چنین محیط رانیز پیوسته درنظر گرفتیم؛ درحالیکه سطح لغزش پیوسته نبوده وانرژی هم مقداری ثابت نیست. بلکه درجائیکه اتم حضور دارد max انرژی ودرجائیکه اتم حضورندارد min انرژی موجوداست. نابجائی درموقعیت min انرژی قرار گرفته است.



موسسه مواد شریف

با حرکت نابجائی، انرژی برواحدطول آن تغییرخواهدکرد. درمسیرحرکت، نابجائی باید قله‌های max انرژی را ردکند که این همان مقدارانرژی لازم برای حرکت است. انرژی نابجائی به موقعیت آن ربط دارد. دررابطه‌ی هال، σ_0 (تنش اصطکاکی شبکه) ناشی ازهمین قله‌ی انرژی است.

$$\sigma = \sigma_0 + \dots$$

* حرکت kink نابجائی راازیک موقعیت min انرژی به min انرژی دیگر می برد.

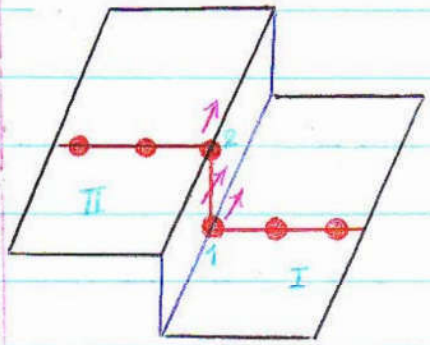
85.12.22

حرکت نابجائی همراه با Jog :

هدف بررسی تأثیر Jog درحرکت نابجائی است.

درمورد نابجائی پله ای :

I. Jog ونابجائی دریک صفحه نباشند :



دراین مورد Jog نمی تواند حرکت کند زیرا واقع درسطح عمودبرسطح فشرده است. درحالتیکه تنها دواتم در Jog وجوددارد (Jog ساده) اتم 1 روی سطح I واتم 2 روی سطح II که هردوسطح فشرده‌اند می توانند حرکت کنند. درنتیجه

موسسه مواد شریف

Jog نیز حرکت می‌کند. بنابراین Jog در این جا برای حرکت نابجائی مانع محسوب نمی‌شود.

II. Jog و نابجائی در یک صفحه باشند:

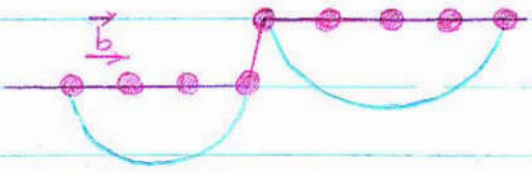
این حالت در واقع همان kink است. در این جا هم kink مانع حرکت نابجائی نمی‌شود.

بنابراین نتیجه می‌شود که در هر دو حالت نابجائی پله‌ای، Jog و kink تأثیری در حرکت ندارند.

در مورد نابجائی پیچی:

قبلاً گفته شد که Jog همواره از نوع پله‌ای است. نابجائی پیچی می‌تواند سطح لغزش خود را عوض کند اما Jog که از نوع پله‌ای است نمی‌تواند سطح لغزش خود را عوض کند و فقط می‌تواند صعود کند. بنابراین در نابجائی پیچی، Jog در حرکت تأثیر دارد و مانع می‌باشد.

اگر بخواهیم خود Jog را بررسی کنیم



و حرکت آنرا مطالعه کنیم حالت های

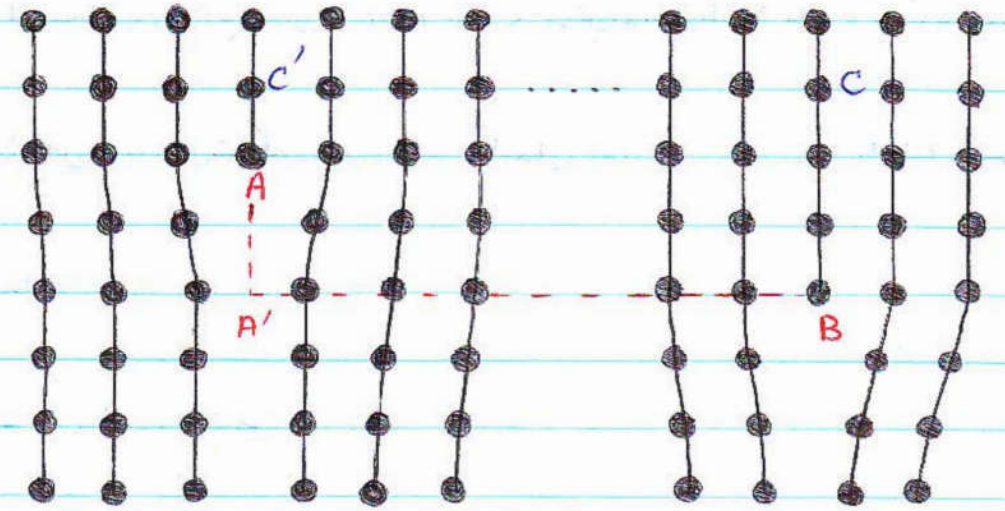
زیر را در نظر می‌گیریم:

اگر Jog بخواهد از A به B برود، به هر طریقی که بخواهد این مسیر را طی کند حالت زیر

موسسه مواد شریف

وجود دارد: لغزش : $A' \rightarrow B$ صعود : $A \rightarrow A'$

درهرصورت تلفیقی از صعود و لغزش داریم . درمرحلهٔ صعود ، تولید vacancy نیز داریم .



حالت دیگر این است که موقعیت B بالاتر از A باشد مثلاً C .

لغزش : $C' \rightarrow C$ صعود : $A \rightarrow C'$

دراین جا مرحلهٔ صعود جذب vacancy می کند .

درهردوحالت ، حرکت Jog با ناجائی همراه تغییردرتعداد vacancy هاست یعنی

افزایش انرژی . درنتیجه همواره بصورت مانع عمل می کند .

تذکر . حرکت ولغزش ناجائی سچی اغلب بصورت تقاطعی است .

انرژی یک Jog عبارتست از : αGb^3 (انرژی برواحدطول $= \alpha Gb^2$ ؛ Jog طول $= b$)

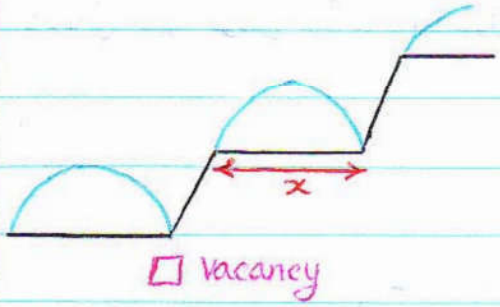
موسسه مواد شریف

می‌توان نتیجه گرفت ، انرژی Vacancy نیز همین است :

نابجائی تا حدی حرکت می‌کند امّا اگر از یک اندازه به بعد

انرژی زیادی بخواهد (چون افزایش طول نابجائی،

موجب افزایش انرژی می‌شود) آنگاه Vacancy



بوجود می‌آید و Jog به اندازه‌ی $\vec{b}$ حرکت می‌کند. در نتیجه حرکت نابجائی آسان می‌شود.

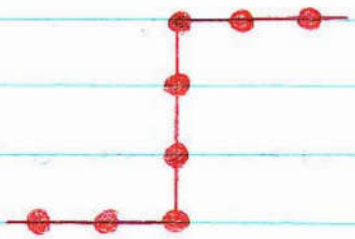
b : جابجائی τbx : نیرو $\Rightarrow$ x = طول نابجائی

$\Rightarrow$ $\tau b^2 x$: کار انجام شده در اثر صعود Jog

$$\tau b^2 x = \alpha G b^3 \quad \mapsto \quad \tau = \frac{\alpha G b}{x}$$

x : فاصلهٔ Jog ها برای صعود . البتّه دما هم کمک می‌کند. در دماهای بالا τ کمتر است .

ممکن است Jog دارای طولی بیش از پارامتر شبکه باشند . در این حالت با Jog مثل نابجائی رفتار می‌کنیم و دیگر آنرا Jog در نظر نمی‌گیریم.

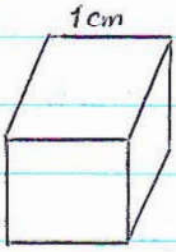


زیرا خود دارای بردار برگرس، سطح لغزش و ... است .

موسسه مواد شریف

منشأ و تکثیر نابجائی :

نابجائی چگونه بوجود می آید و آیا طول آن زیاد می شود یا نه ؟



$V = 1\,cm^3$

$\text{دانسیتهٔ نابجائی} = 10^6 \ \text{خط}/cm^2$

اگر نابجائی کل سطح را جاروکند، در اثر حرکت یک نابجائی اگر لغزش متوسط $\frac{b}{2}$ باشد،

مقدار کل لغزش عبارتست از : $10^6 \times \frac{b}{2} \xrightarrow{b=2\times10^{-8}} 10^{-2} = 1\%$

یعنی اگر همهٔ نابجائی ها در تغییر طول شرکت کنند و همگی بلغزند ، 1٪ تغییر طول داریم .

درصورتیکه برای Al تغییر طول خیلی بیشتر است (40٪) . در یک جسم تغییر شکل

یافته دانسیتهٔ ی نابجائی ها در حدود 10^{11} خط/cm^2 است . این نابجائی ها از کجا آمده اند

و چگونه زیاد شده اند ؟

ابتدا منشأ را بررسی می کنیم : همان 10^6 خط بر cm^2 از کجا آمده است ؟ زیرا می دانیم

نابجائی تعادل ترمودینامیکی ندارد و همواره انرژی را زیاد می کند . از طرفی با هیچ عملیات

حرارتی نمی توان آن را از بین برد . نابجائی در حین فرایند انجماد بوجود می آید . و وقتی که

موسسه مواد شریف

بوجود آمد دیگر نمی توان آن را از بین برد. از سه حالت زیر نابجائی ممکن است بوجود آید:

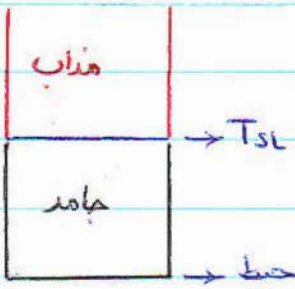
1 ـ تراکم تنش 2 ـ حلقه‌های vacancy

3 ـ نابجائی پیچی حین انجماد.

تراکم تنش ناشی از تغییر درجه حرارت و متفاوت بودن آن در جاهای مختلف مذاب است.

در این مورد بعداً بحث خواهد شد.

در مورد حلقه‌ی نابجائی:



در دمای محیط vacancy ها کمتر از دمای T_{SL}. چون T_{SL} از درجه حرارت محیط بیشتر است. این vacancy ها تشکیل حلقه می‌دهند و این حلقه‌ها اتصال بین دو صفحه را از بین برده و dislocation بوجود می آورد.

رشد دانه‌ها در جهت سطوح فشرده است و در جهت رشد، اتم‌ها روی سطح می نشینند که شبیه به یک جزیره است و اطراف آن مذاب می‌باشد. امّا اطراف نابجائی پیچی اتم‌ها بصورت مارپیچ قرار دارند و چون در این حالت اتم‌ها با هم بهتر ارتباط دارند، رشد انجماد سریع‌تر شده

موسسه مواد شریف

واین نابجائی باقی خواهدماند.

حال علت زیادشدن نابجائی دراثر تغییرشکل پلاستیک رابررسی می کنیم :

جوانه زنی نابجائی :

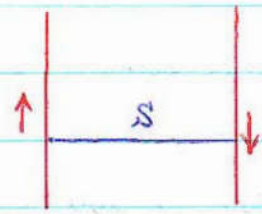
I . بوجودآمدن یک نابجائی دریک قسمت بی عیب بلور دراثر تنش (که موجب شکست صفحه شده و دونیم صفحه بوجود می آورد) ← جوانه زنی هموژن

II . دراثر تراکم تنش درقسمت های خاص بلور، نابجائی می تواند جوانه بزند. ← جوانه زنی غیرهموژن.

جوانه زنی هموژن :

امکان بوقوع آمدن تشکیل نابجائی بدین روش رامی سنجیم. نابجائی راپیچی فرض می کنیم زیرا جمله‌ی (۷ـ۱) ندارد ومحاسبات ساده‌تر می شود. فرض دیگراین است که دونابجائی پیچی دریک لحظه بوجود آمده اند درخلاف جهت هم واز یکدیگر دور می شوند.

می خواهیم تنش لازم برای جوانه زنی رابدست آوریم:



انرژی الاستیک بر واحد طول نابجائی $= \alpha G b^2$

موسسه مواد شریف