

مکانیزم‌های تغییر شکل پلاستیکی فلزات

دو مکانیزم مهم تغییر شکل پلاستیکی فلزات:

۱. مکانیزم لغزش (*Slip*)

۲. مکانیزم تشکیل دوقلویی (*Twinning*)

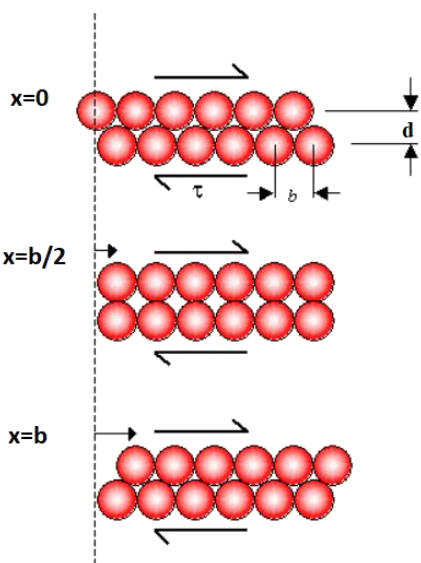
۱. مکانیزم لغزش

مهم‌ترین مکانیزم تغییر شکل پلاستیکی فلزات از طریق لغزش صفحات بلوری روی هم اتفاق می‌افتد.

لغزش در بلور کامل (بدون عیب)

هدف محاسبه تنش برشی لازم برای لغزش دو صفحه بلوری روی هم است. اگر فرض شود لغزش صفحات اتمی روی هم با انتقال

کامل یک صفحه اتمی روی صفحه دیگر اتفاق می‌افتد، داریم:



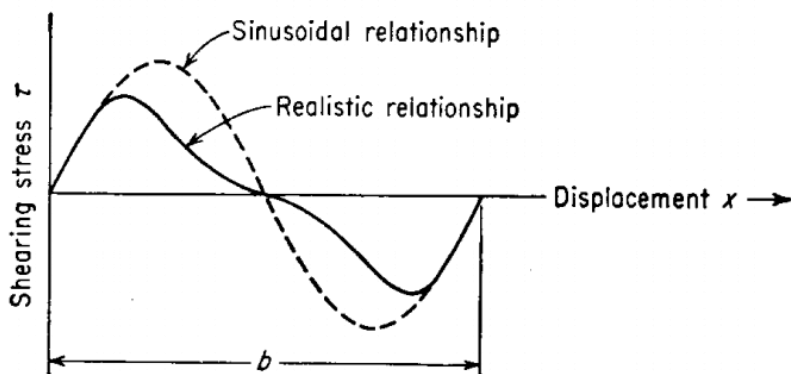
(۱) وضعیت دو صفحه قبل از شروع لغزش (قبل از اعمال تنش)

(۲) وضعیت دو صفحه در آستانه لغزش (جابجایی به اندازه $b/2$)

(۳) وضعیت دو صفحه پس از لغزش (جابجایی به اندازه b)

تغییرات تنش برشی برای حرکت صفحه بالایی روی صفحه پایینی را می‌توان به صورت زیر نمایش داد: (*Realistic* نشان

دهنده تغییرات واقعی و *Sinusoidal*: نشان دهنده نمودار سینوسی تخمینی برای تغییرات)



رابطه نمودار سینوسی برای تغییرات تنش برشی:

$$\tau = \tau_{max} \times \sin\left(\frac{2\pi x}{b}\right)$$

τ_{max} : دامنه موج سینوسی (حداکثر تنش لازم برای وقوع لغزش) (استحکام تئوری)

b : دوره تناوب رابطه سینوسی (فاصله بین موقعیت های تعادلی)

x : جابجایی دو صفحه بلوری نسبت به هم

از طرفی داریم:

$$\tau = G \times \gamma$$

γ : کرنش برشی

G : مدول برشی

برای جابجایی ها (x ها) کوچک:

$$\left. \begin{array}{l} \tau = \tau_{max} \times \frac{2\pi x}{b} \\ \tau = G \times \gamma = G \times \frac{x}{d} \end{array} \right\} \tau_{max} \times \frac{2\pi x}{b} = G \times \frac{x}{d} \xrightarrow{b \approx d} \tau_{max} = \frac{G}{2\pi}$$

برای فلزات: $G \approx 10^6 - 10^7 Psi$

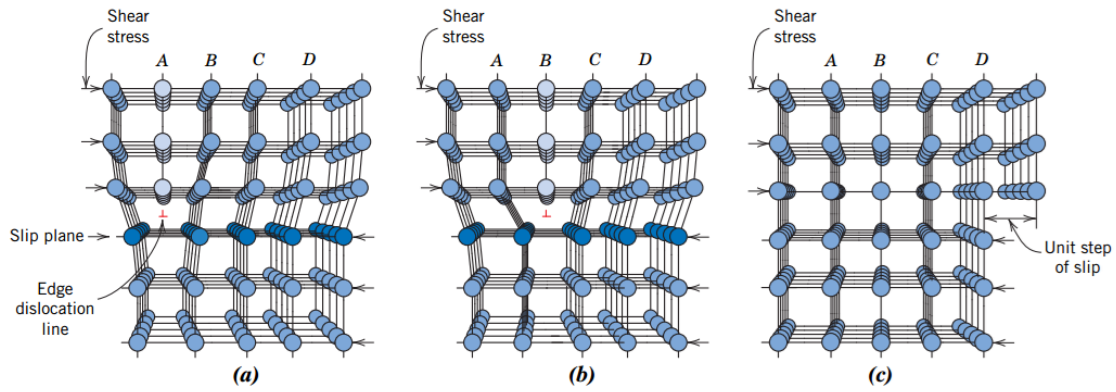
استحکام برشی تئوری فلزات از رابطه بالا (τ_{max}): $\tau_{max} \approx 10^5 - 10^6 Psi$

استحکام واقعی فلزات: $\tau \approx 10^2 - 10^4 Psi$

یعنی استحکام واقعی فلزات یا تنش برشی لازم برای تغییر شکل آنها (لغزش دو صفحه روی هم) بسیار کمتر از استحکام تئوری محاسبه شده از رابطه بالا است. دلیل آن وجود نابجایی در بلور است.

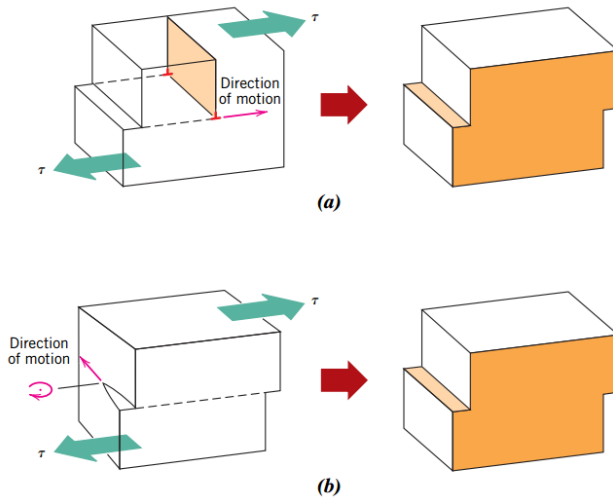
لغزش در بلور حاوی نابجایی:

لغزش در بلور حاوی نابجایی طبق شکل های زیر اتفاق می افتد. مطابق شکل در لغزش به کمک نابجایی، در هر مرحله از حرکت فقط ارتباط یک ردیف اتم با همسایه هایشان قطع می شود در حالی که در لغزش بلور کامل در یک مرحله ارتباط تمام اتم های دو صفحه باید قطع شود و در نتیجه لغزش به کمک نابجایی انرژی بسیار کمتری نسبت به لغزش بلور کامل لازم است.



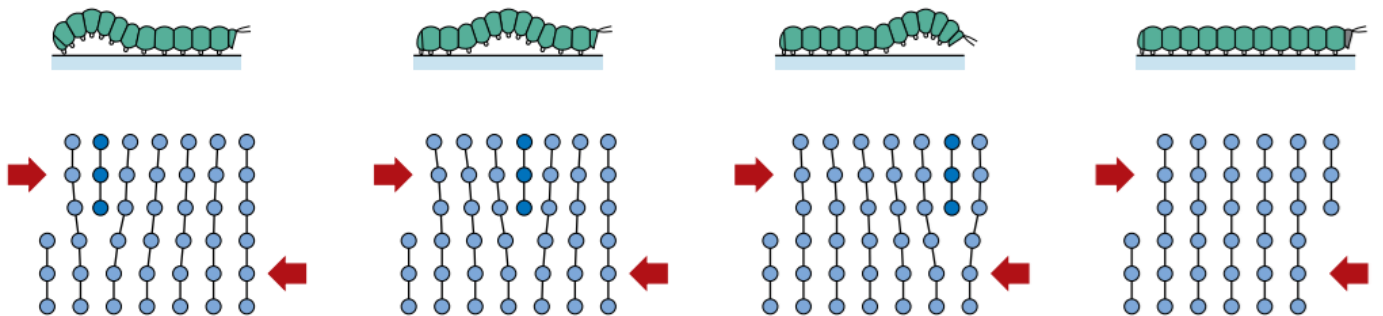
Atomic rearrangements that accompany the motion of an edge dislocation as it moves in response to an applied shear stress. (a) The extra half-plane of atoms is labeled A. (b) The dislocation moves one atomic distance to the right as A links up to the lower portion of plane B; in the process, the upper portion of B becomes the extra half-plane. (c) A step forms on the surface of the crystal as the extra half-plane exits.

مطابق شکل‌های زیر با حرکت نابجایی از یک سمت بلور به سمت دیگر آن، دو قسمت بلور نسبت به هم جابجا می‌شوند.



The formation of a step on the surface of a crystal by the motion of (a) an edge dislocation and (b) a screw dislocation. Note that for an edge, the dislocation line moves in the direction of the applied shear stress τ ; for a screw, the dislocation line motion is perpendicular to the stress direction.

شبهاتی که بین لغزش به کمک نابجایی و حرکت کرم ابریشم وجود دارد (این شکل از حرکت، نیازمند صرف انرژی کمی است).



The analogy between caterpillar and dislocation motion.

تنش پیرلس:

تنش لازم برای لغزش به کمک نابجایی به وسیله رابطه پیرلس بیان می‌شود.

$$\tau_p = \frac{2G}{1-\vartheta} e^{-\left(\frac{2\pi w}{b}\right)} = \frac{2G}{1-\vartheta} e^{-\left(\frac{2\pi d}{(1-\vartheta)b}\right)}$$

τ_p : تنش پیرلس

ϑ : ضریب پواسون

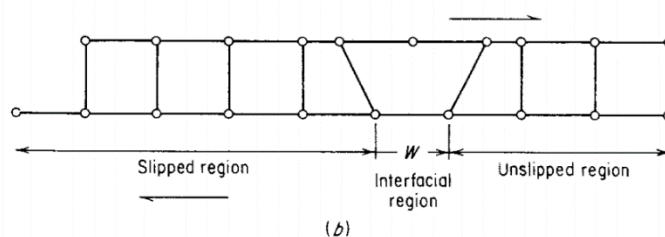
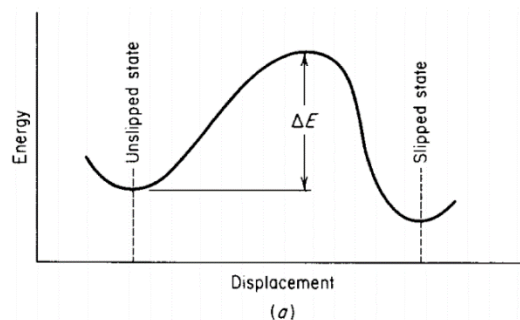
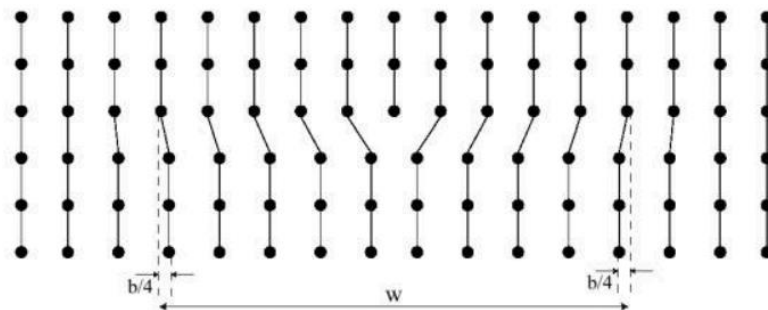
G : مدول برشی

w : عرض نابجایی ($w = \frac{d}{1-\vartheta}$)

d : فاصله بین صفحات اتمی

b : جابجایی اتمها در یک مرحله (بردار برگرز)

اگر خط نابجایی را به عنوان مرز بین ناحیه لغزش کرده و لغزش نکرده در صفحه لغزش در نظر بگیریم، عرض نابجایی معیاری است برای وضوح این مرز. مطابق شکل، تا چند فاصله اتمی اطراف خط نابجایی، اتمها از موقعیت تعادلی خود فاصله دارند. حقیقت محدوده عرض نابجایی، محدوده‌ای است که در آن اتمها حالتی مابین لغزش کرده و لغزش نکرده دارند. برای نابجایی لبه‌ای، عرض نابجایی (w) را به صورت فاصله‌ای که در آن جابجایی صفحه نسبت به موقعیت تعادلی بیشتر از یک چهارم بردار برگرز باشد، تعریف می‌شود.



(a) Energy change from unslipped to slipped state; (b) stages in growth of slipped region.

طبق رابطه پیرلس:

هر چه W بزرگتر $\leftarrow \tau_p$ کمتر و لغزش راحت تر است.

(در فلزات نرم، W در حدود ۱۰-۱۲ فاصله اتمی است. در مواد سرامیکی، به دلیل وجود پیوندهای قوی و مستقیم با یون مخالف، W کم است.)

- زمانی که b کم و d زیاد باشد $\leftarrow \tau_p$ کمتر و لغزش راحت تر است.

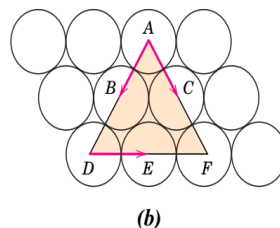
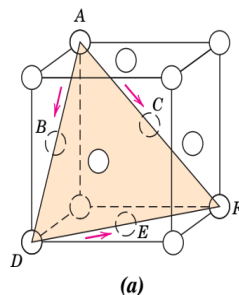
به همین خاطر لغزش نابجایی‌ها معمولاً روی صفحات با فاصله زیاد از هم و در جهات با فاصله بین اتمی کم اتفاق می‌افتد.

در یک عمل لغزش، یک صفحه لغزش (*Slip plane*) داریم و یک جهت لغزش (*Slip direction*) که به مجموعه آنها سیستم لغزش (*Slip system*) گویند. همانطور که در رابطه پیرلس مشاهده شد معمولاً صفحات لغزش، صفحات با بیشترین فاصله از هم (صفحات پزدانسیته بلور) و جهات لغزش، جهات با کمترین فاصله بین اتمی (جهات پزدانسیته) هستند.

بررسی سیستم‌های لغزش شبکه‌های بلوری فلزات صنعتی (*BCC* و *HCP*، *FCC*):

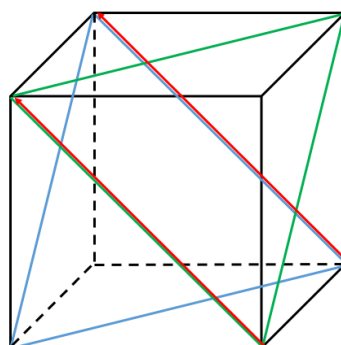
۱. فلزات با شبکه *FCC*:

در شبکه *FCC* فشرده‌ترین صفحات، صفحات خانواده $\{111\}$ و فشرده‌ترین جهات، جهات خانواده $\langle 110 \rangle$ هستند. لغزش روی صفحات و در جهات ذکر شده اتفاق می‌افتد.



(a) A $\{111\}\langle 110 \rangle$ slip system shown within an FCC unit cell. (b) The (111) plane from (a) and three $\langle 110 \rangle$ slip directions (as indicated by arrows) within that plane constitute possible slip systems.

تعداد سیستم‌های لغزش مستقل در یک بلور \leftarrow تعداد سیستم‌هایی که کرنش‌های برشی یکسان و هم‌جهت در بلور ایجاد نمی‌کنند.



تعداد صفحات بلوری $\{111\}$ غیرموازی در شبکه FCC: ۴

تعداد جهات $\langle 110 \rangle$ غیرموازی روی هر صفحه $\{111\}$: ۳

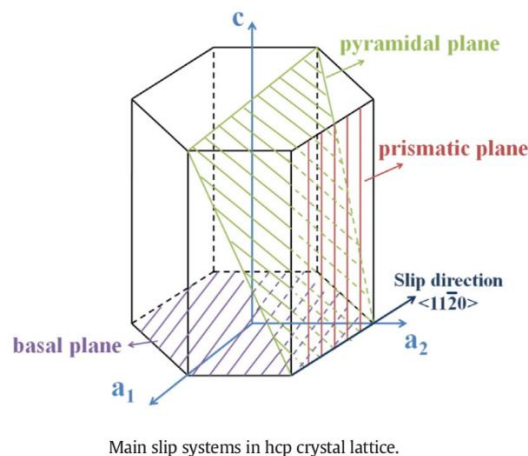
بنابراین تعداد سیستم‌های لغزش مستقل (*Independent slip systems*) برابر است با:

$$\{111\}\langle 110 \rangle \\ 4 \times 3 = 12$$

یعنی در این شبکه بلوری ۱۲ سیستم لغزش مستقل یا غیرموازی داریم.

۲- فلزات با شبکه HCP:

در شبکه HCP فشرده‌ترین صفحات، صفحات خانواده $\{0001\}$ و فشرده‌ترین جهات، جهات خانواده $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ هستند. لغزش روی سیستم‌های متشکل از این صفحات و جهات در اولویت است. با این وجود صفحات فشرده دیگری $\{10\bar{1}0\}$ و $\{10\bar{1}1\}$ نیز وجود دارند که لغزش روی آنها نیز اتفاق می‌افتد. در این موارد نیز جهت لغزش، همان جهت $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ است.



$\{0001\}$: صفحات قاعده (*Basal planes*)

$\{10\bar{1}0\}$: صفحات منشوری (*Prismatic planes*)

$\{10\bar{1}1\}$: صفحات هرمی (*Pyramidal planes*)

محاسبه تعداد سیستم‌های لغزش مستقل در شبکه HCP:

$$\{0001\}\langle 11\bar{2}0 \rangle$$

$$1 \times 3 = 3$$

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

$$3 \times 1 = 3$$

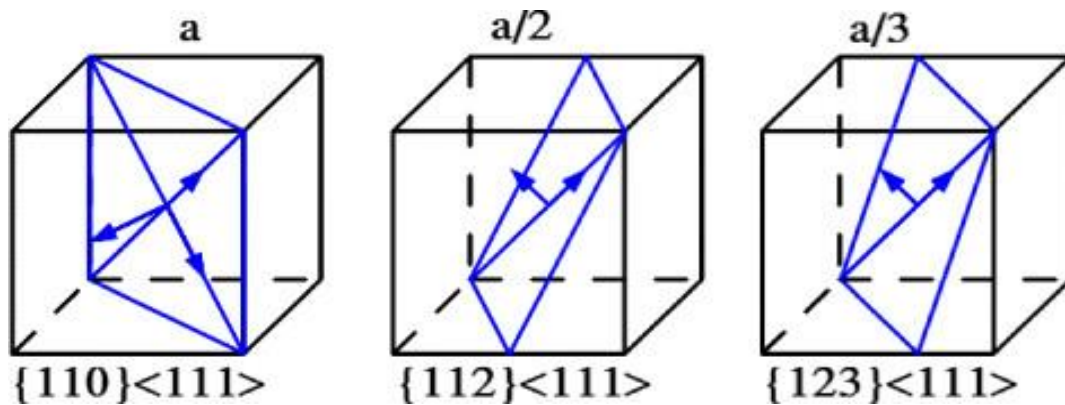
$$\{10\bar{1}1\}\langle 11\bar{2}0 \rangle$$

$$6 \times 1 = 6$$

بنابراین مجموعاً $۱۲=۶+۳+۳$ سیستم لغزش مستقل در شبکه HCP وجود دارد.

۳- فلزات با شبکه BCC :

ساختار BCC به فشردگی ساختارهای FCC و HCP نیست و هیچ صفحه‌ای با چگالی اتمی غالب مانند $\{0001\}$ در HCP و $\{111\}$ در FCC ندارد. صفحات $\{110\}$ بیشترین چگالی اتمی را دارند ولی ارجحیت چندانی نسبت به بقیه صفحات ندارند. اما این شبکه جهت فشرده $\langle 111 \rangle$ را دارد که معمولاً لغزش در آن جهت اتفاق می‌افتد. بنابر مطالب گفته شده، سیستم‌های لغزش شبکه BCC به شرح زیر هستند:



$$\begin{aligned} &\{110\}\langle 111 \rangle \\ &6 \times 2 = 12 \\ &\{211\}\langle 111 \rangle \\ &12 \times 1 = 12 \\ &\{321\}\langle 111 \rangle \\ &24 \times 1 = 24 \end{aligned}$$

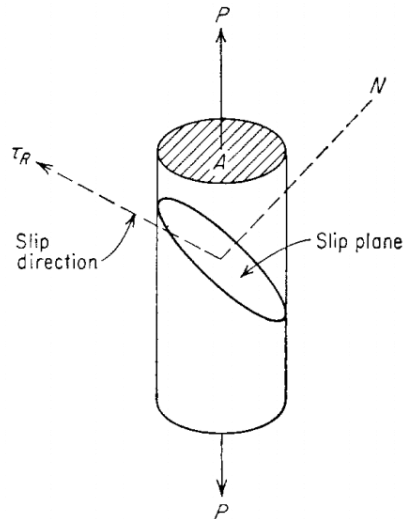
بنابراین مجموعاً $۴۸=۲۴+۱۲+۱۲$ سیستم لغزش مستقل در شبکه BCC وجود دارد.

محاسبه تنش برشی تفکیک شده برای لغزش در یک تک بلور:

فرض کنید یک تک بلور داریم که تحت تنش خارجی قرار گرفته است. مقدار تنش برشی ایجاد شده در جهت لغزش به مقدار نیروی اعمالی خارجی، شکل هندسی بلور و جهت گیری صفحات و جهات لغزش نسبت به تنش اعمالی بستگی دارد. در حقیقت پارامترهای ذکر شده در بالا، مقدار تنش برشی ایجاد شده در جهت لغزش را تعیین می‌کنند که به آن تنش برشی تفکیک شده (*resolved shear stress*) می‌گویند.

هنگامی لغزش در یک سیستم لغزش آغاز می‌شود که مقدار تنش برشی تفکیک شده در جهت لغزش به یک میزان معین و بحرانی برسد. به این مقدار، تنش برشی تفکیک شده بحرانی (*critical resolved shear stress*) می‌گویند.

مقدار تنش بحرانی تفکیک شده به پارامترهایی مانند دما و ترکیب شیمیایی بستگی دارد.



یک تک‌بلور استوانه‌ای در نظر می‌گیریم که تحت نیروی تک‌محوره خارجی مطابق شکل قرار گرفته است. می‌خواهیم بدانیم تنش برشی اعمال شده در صفحه لغزش چقدر است.

فرضیات:

P_S : مؤلفه نیروی P در جهت لغزش

A_1 : مساحت صفحه لغزش

τ_R : تنش برشی تفکیک شده (تنش برشی در جهت لغزش)

ϕ : زاویه بین امتداد نیروی P و امتداد عمود بر صفحه لغزش

λ : زاویه بین امتداد نیروی P و جهت لغزش

$$\tau_R = \frac{P_S}{A_1} \quad \left\{ \begin{array}{l} P_S = P \cos \lambda \\ A_1 = \frac{A}{\cos \phi} \end{array} \right\} \Rightarrow \tau_R = \frac{P \cos \lambda}{A / \cos \phi} = \frac{P}{A} \cos \lambda \cos \phi$$

زمانی لغزش در این صفحه و در جهت لغزش اتفاق می‌افتد که مقدار τ_R (تنش برشی تفکیک شده) به مقدار τ_{RC} (تنش برشی تفکیک شده بحرانی) برسد، یعنی:

$$\tau_{RC} = \frac{P}{A} \cos \lambda \cos \phi$$

نکته: τ_R مقدار تنش برشی اعمال شده در جهت لغزش است که با تغییر زوایای بالا، نیروی خارجی و مساحت تغییر می‌کند. ولی τ_{RC} مقدار تنش برشی اعمال شده در جهت لغزش در هنگام شروع لغزش است که برای یک سیستم لغزش در یک ماده مشخص و در دمای مشخص، مقدار ثابتی دارد.

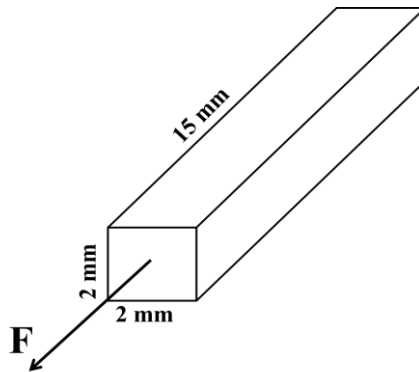
به رابطه بالا رابطه اشמיד (*Schmid*) و به عبارت $m = \cos \lambda \cos \phi$ فاکتور اشמיד می‌گویند.

طبق رابطه اشמיד، زمانی می‌توان با حداقل تنش عمودی ($\frac{P}{A}$) لغزش ایجاد کرد که فاکتور اشמיד (m) حداکثر مقدار خود را داشته باشد، حداکثر این فاکتور زمانی است که $\lambda = \phi = 45^\circ$ و در این شرایط:

$$\tau_{RC} = \frac{1}{2} \frac{P}{A}$$

مثال:

تک‌بلوری با شبکه مکعبی به شکل مکعب مستطیل و به ابعاد $15 \times 2 \times 2 \text{ cm}$ را در جهت $[100]$ تحت اثر نیروی کششی معادل با 1000 kg قرار می‌دهیم. در صورتی که تنش برشی بحرانی در جهت $[110]$ واقع در صفحه $(1\bar{1}0)$ برابر با 1 kg/mm^2 باشد. تعیین نمایید لغزش در این جهت رخ می‌دهد یا خیر.



$$A \cdot B = |A||B|\cos \alpha$$

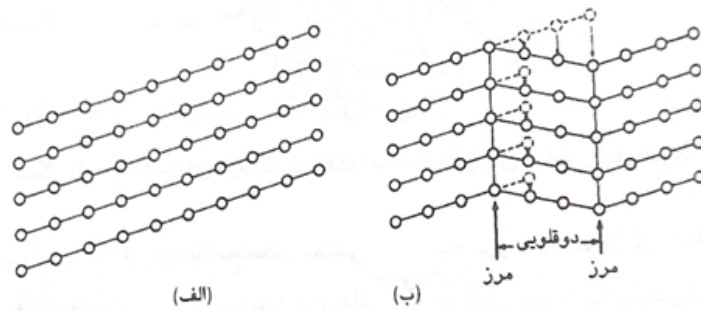
$$\cos \phi = \frac{1 \times 1 + (-1) \times 0 + 0 \times 0}{\sqrt{1^2 + 0^2 + 0^2} \times \sqrt{1^2 + (-1)^2 + 0^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$\cos \lambda = \frac{1 \times 1 + 1 \times 0 + 0 \times 0}{\sqrt{1^2 + 0^2 + 0^2} \times \sqrt{1^2 + 1^2 + 0^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$\phi = \lambda = 45^\circ \Rightarrow \tau_R = \frac{F}{A} \cos \phi \cos \lambda = \frac{1000}{20 \times 20} \times \frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{1}{\sqrt{2}} = 1.25 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2} < 1.5 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$$

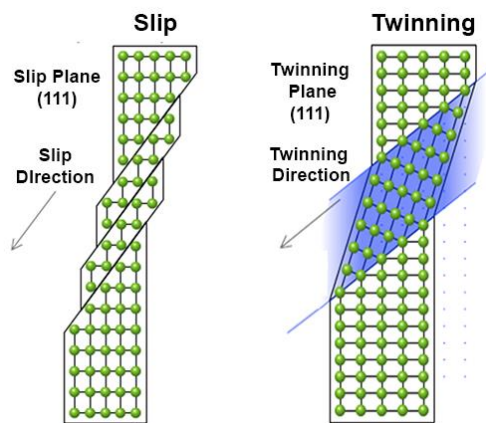
۲. مکانیزم تغییر شکل پلاستیکی توسط تشکیل دوقلوها

برای تغییر شکل پلاستیکی یک چندبلور، حداقل ۵ سیستم لغزش مستقل باید فعال شوند. در هنگام کم بودن سیستم‌های لغزش مستقل فعال، دوقلویی برای کمک به تغییر شکل عمل می‌کند. دوقلویی شدن بلور باعث تغییر جهت آن نسبت به جهت اولیه و افزایش احتمال فعال شدن سیستم‌های لغزش می‌شود. همانطور که قبلاً گفته شد، دوقلویی شدن مکانیزمی است که توسط آن قسمتی از یک بلور در جهتی قرار می‌گیرد که تصویر آینه‌ای از بلور اصلی است.



مقایسه لغزش و دوقلویی:

۱. آرایش بلوری در بالا و پایین صفحه لغزش یکسان است. اما در بالا و پایین صفحه دوقلویی متفاوت است.



۲. در لغزش، اتم‌ها به اندازه یک یا چند فاصله اتمی حرکت می‌کنند ولی در دوقلویی فاصله حرکت اتم‌ها، کسری از فاصله بین اتمی است.

۳. لغزش به کمک نابجایی صورت می‌گیرد ولی برای دوقلویی شدن نیازی به نابجایی نداریم.

۴. دوقلویی بیشتر در شبکه‌های *HCP* و *BCC* و کمتر در شبکه‌های *FCC* اتفاق می‌افتد.

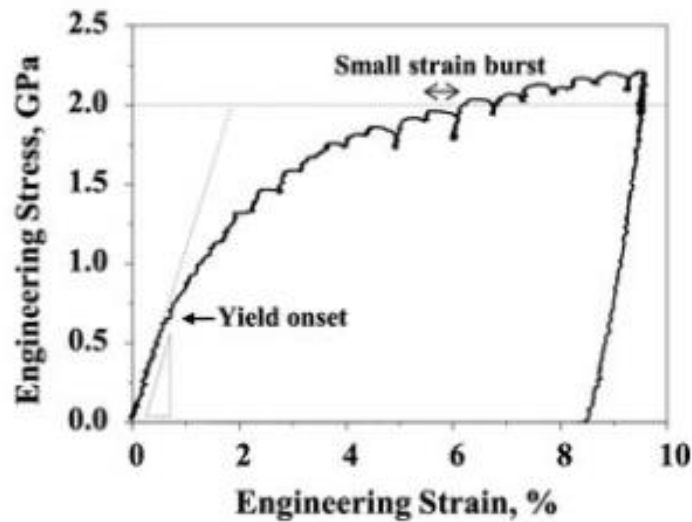
خصوصاً در شبکه *HCP* که تعداد سیستم‌های لغزش محدودی دارد به طور متداول دیده می‌شود. در بلورهای *HCP*، در اثر تشکیل دوقلویی قسمت‌هایی از بلور نسبت به جهت اعمال نیرو تغییر جهت داده و در نتیجه احتمال فعال شدن سیستم‌های لغزش دیگر را فراهم می‌کنند.

۵. دوقلویی در فاصله زمانی چند میکروثانیه و لغزش در چند هزارم ثانیه اتفاق می‌افتد.

۶. ایجاد دوقلویی گاهی همراه با آزاد شدن میزان زیادی انرژی به صورت صوت است. (مانند فریاد یا جیغ قلع که اصطلاحی برای صدای تولید شده در اثر ایجاد دوقلویی در قلع است).

۷. اگر در حین آزمایش کشش، دوقلویی تشکیل شود، ممکن است دندانه‌هایی روی نمودار ظاهر شود.

مثال: نمودار کششی کادمیم (*Cd*)



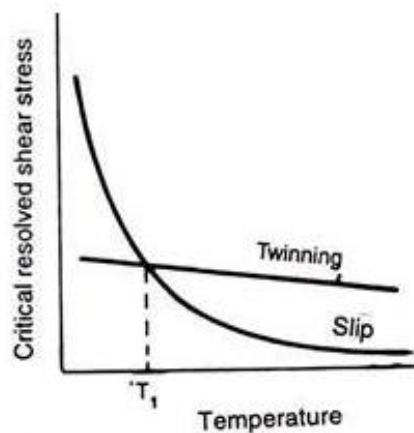
۸. دوقلویی بیشتر در دماهای پایین و سرعت های بارگذاری زیاد اتفاق می افتد.

۹- طبق یک قاعده کلی، مکانیزم ارجح بین لغزش و دوقلویی مکانیزمی است که دارای تنش بحرانی تفکیک شده کمتری باشد.

اما بررسی ها نشان می دهد که میزان تنش بحرانی وابسته به عوامل متعددی از جمله دما و ترکیب شیمیایی است.

مثال: تغییرات تنش برشی بحرانی هر یک از مکانیزم ها بر حسب دما برای یک آلیاژ با شبکه BCC به صورت زیر به دست آمده

است.



Effect of temperature on CRSS for twinning and slip.

با توجه به این نمودار:

در دماهای $T < T_1$ مکانیزم غالب، دوقلویی است.

در دماهای $T > T_1$ مکانیزم غالب، لغزش است.

۱۰- دوقلویی نیز مانند لغزش روی صفحات و در جهات خاصی اتفاق می افتد.