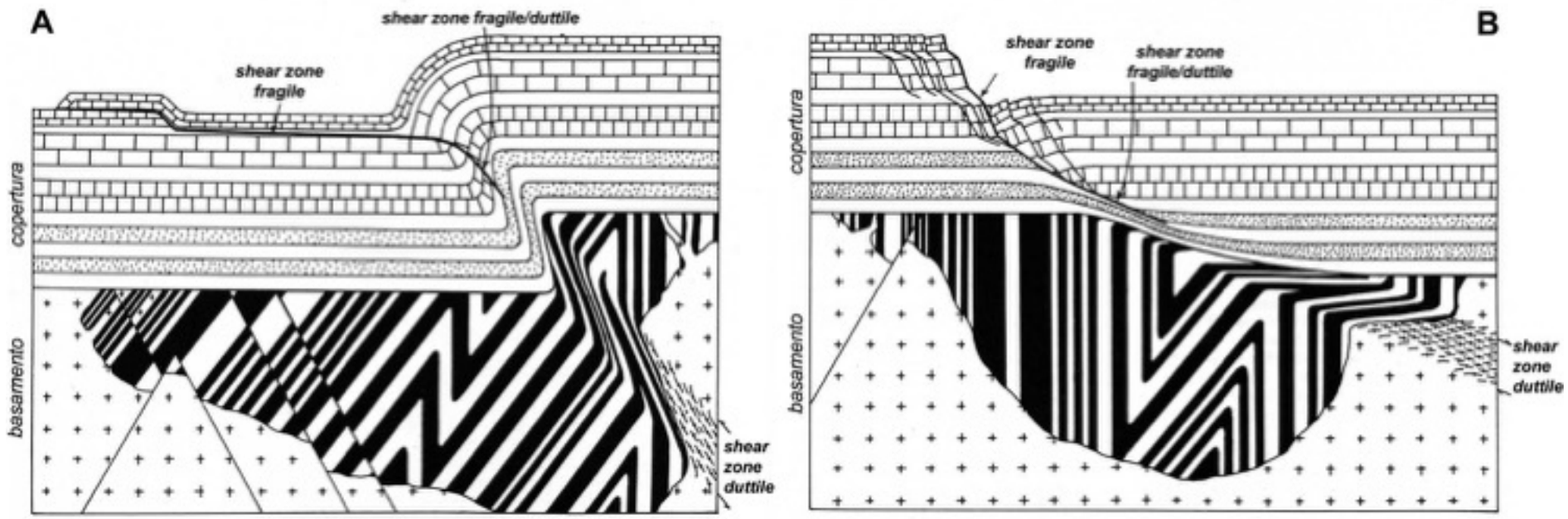
Microstrutture, tessiture, meccanismi deformativi in rocce deformate

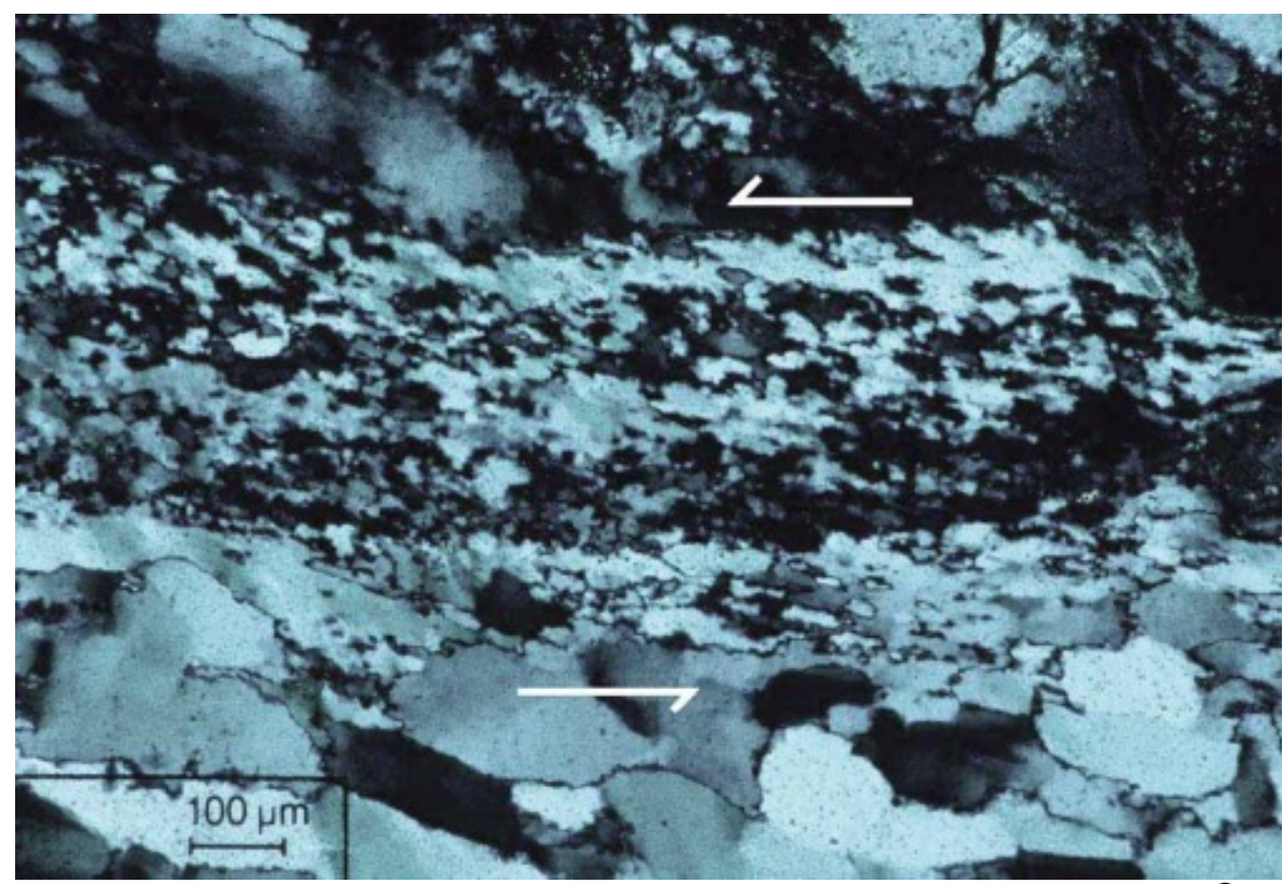
P. Conti

Maggio 2018

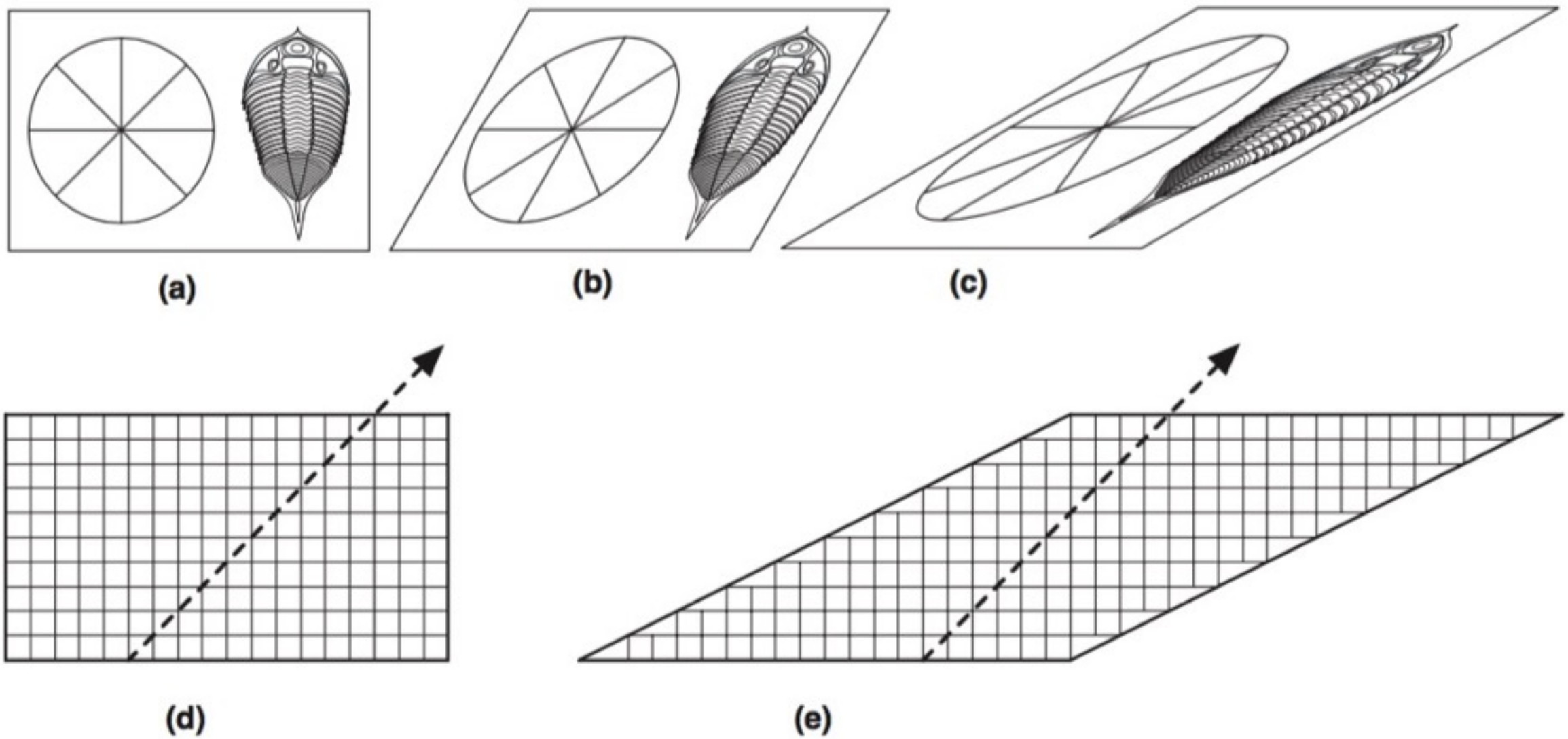
Deformazione intracristallina

Deformazione intracristallina





Deformazione intracristallina



Difetti in cristalli reali

La deformazione di cristalli reali è fortemente in relazione con la presenza e il movimento di difetti reticolari.

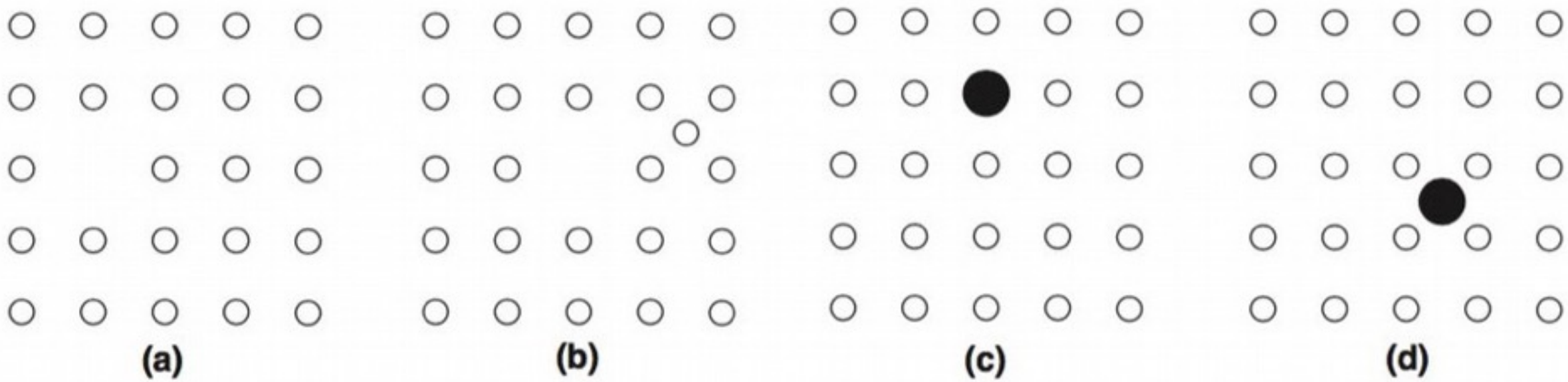
Possono essere:

a) difetti puntiformi

b) difetti unidimensionali (o lineari): dislocazioni

c) difetti bidimensionali (o planari): limiti tra i grani

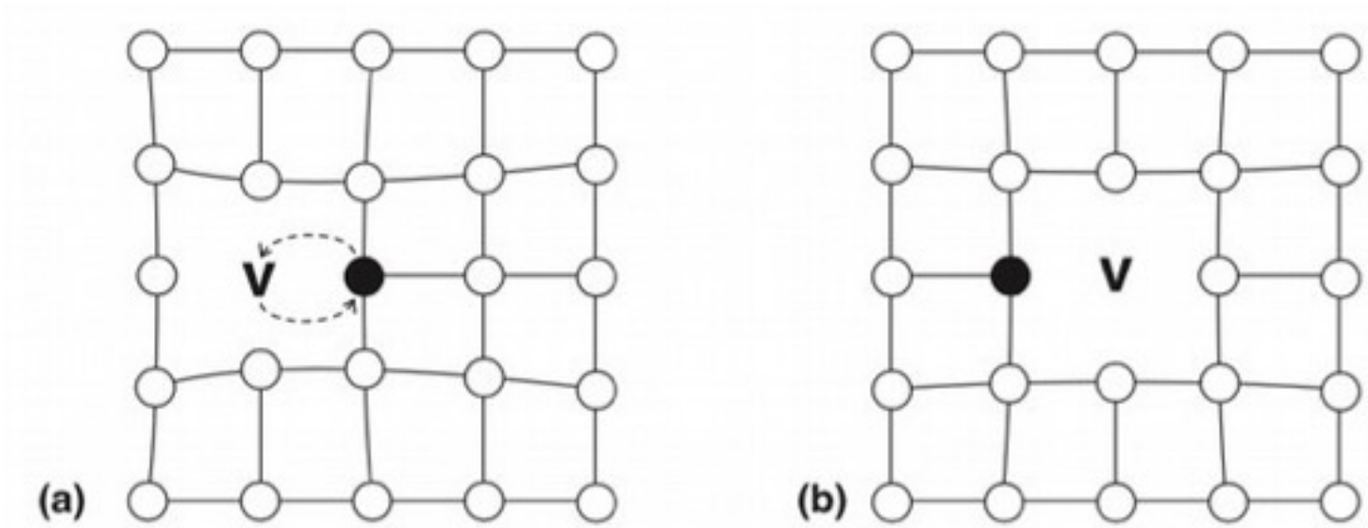
Difetti puntiformi

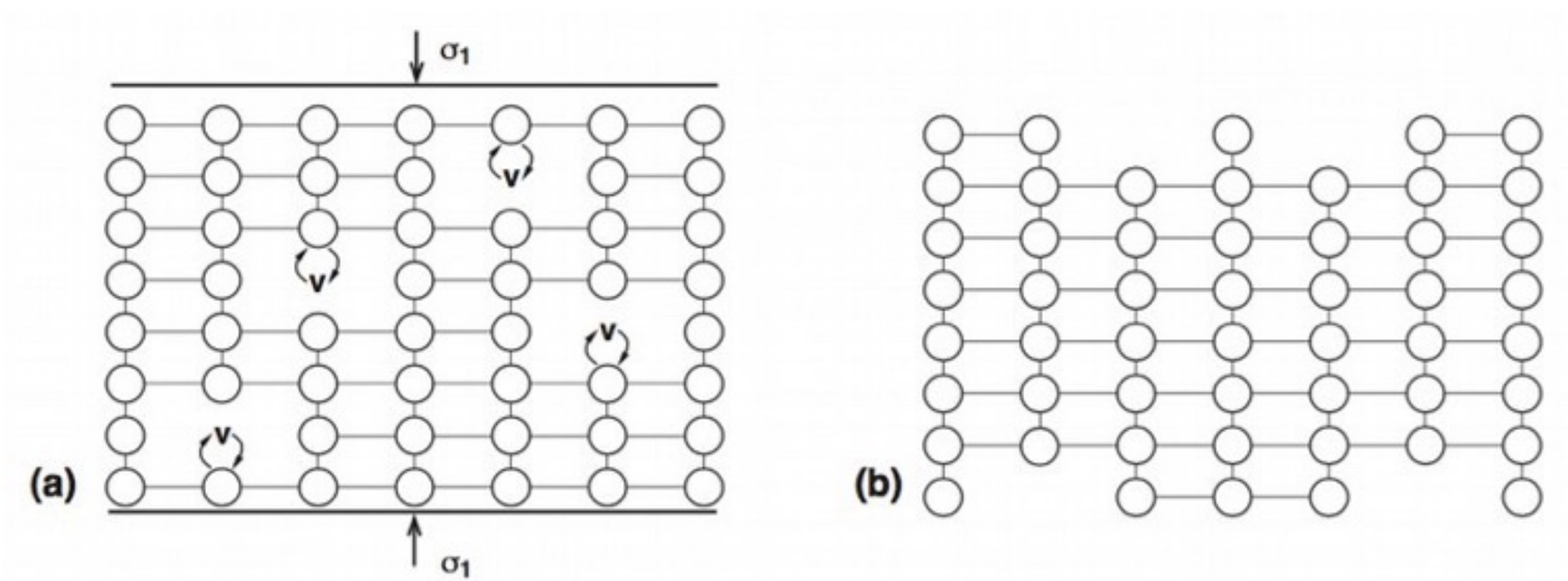


Difetti puntiformi in cristalli. (a) Siti reticolari vacanti. (b) Atomi che occupano posizioni non reticolari. (c) Impurità sostituzionali. (d) Impurità interstiziali.

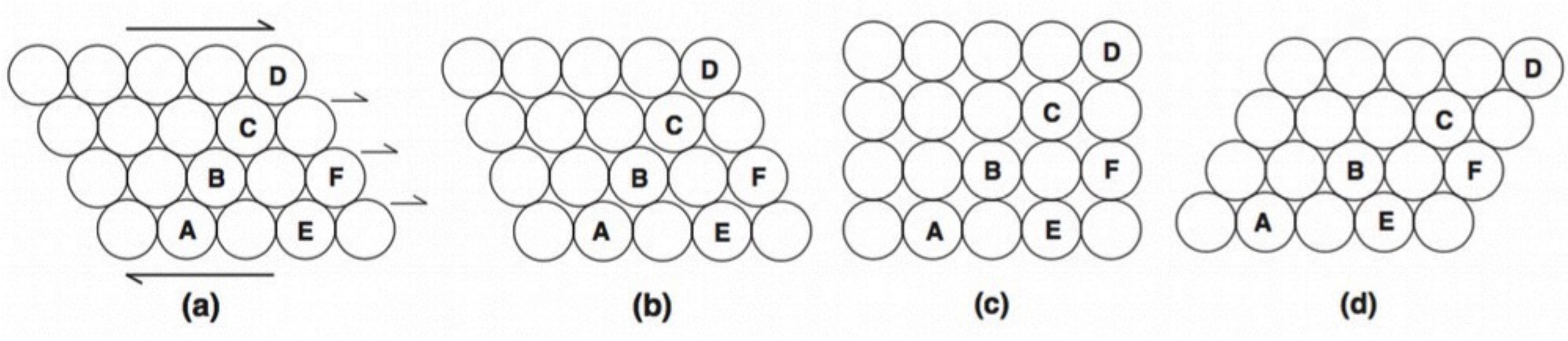
Difetti puntiformi

Movimento di difetti puntiformi: diffusione





Difetti lineari

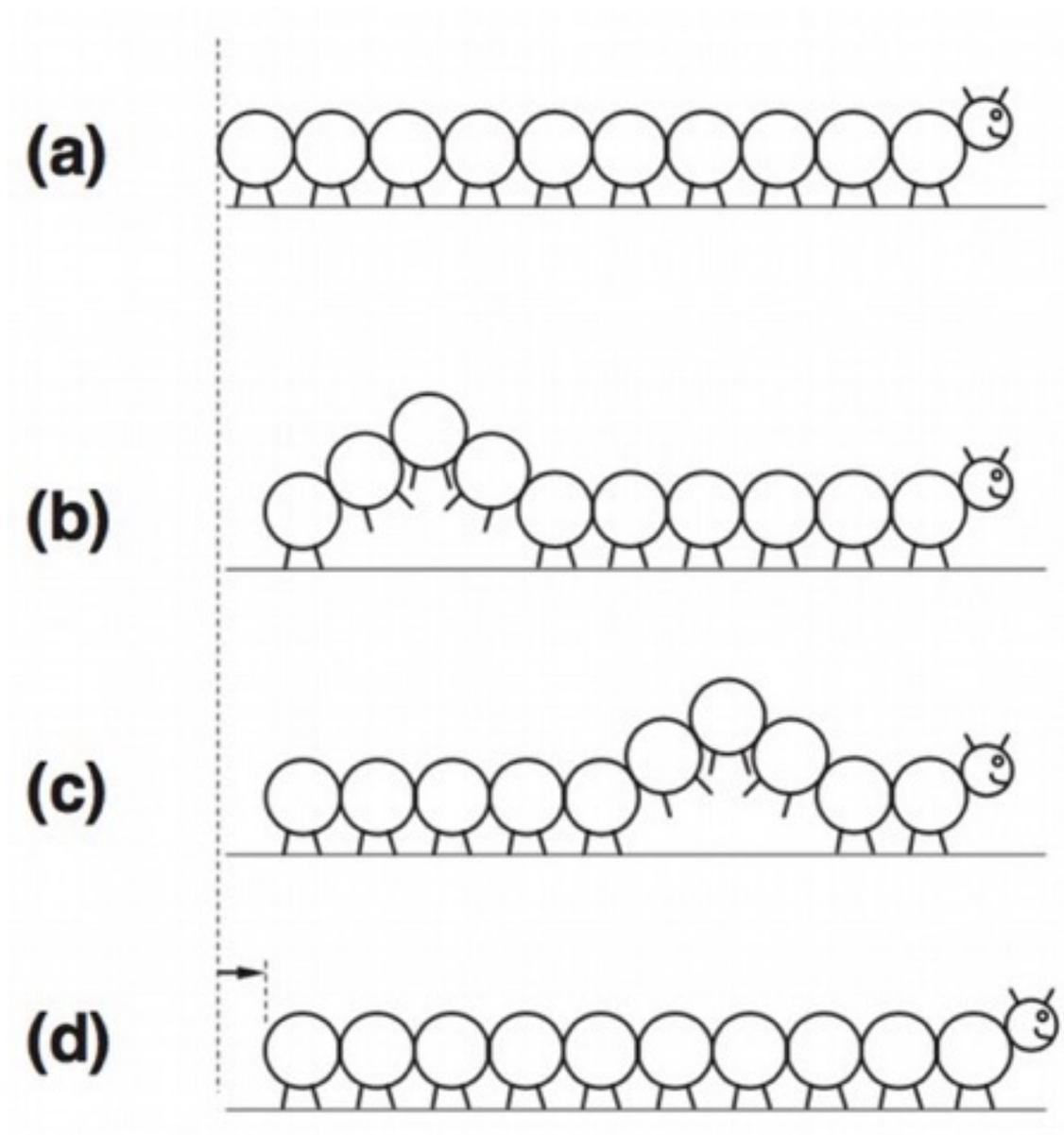


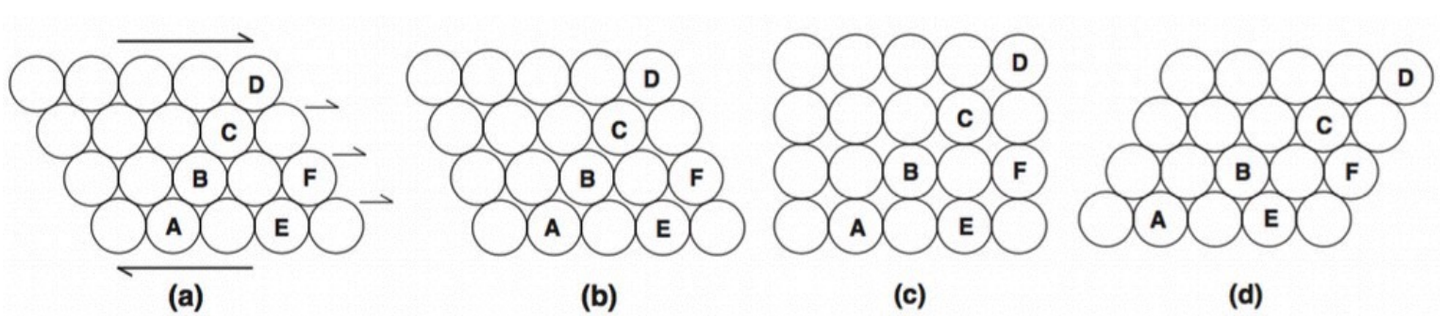
- Stress necessario è la resistenza teorica al taglio (*theoretical shear strength,* anche limite teorico elastico, *theoretical elastic limit*).
- La resistenza teorica al taglio è di parecchi ordini di grandezza (ca. 10^5) maggiore rispetto a quella reale.
- Le rocce si deformano più facilmente.

Deformazione intracristallina

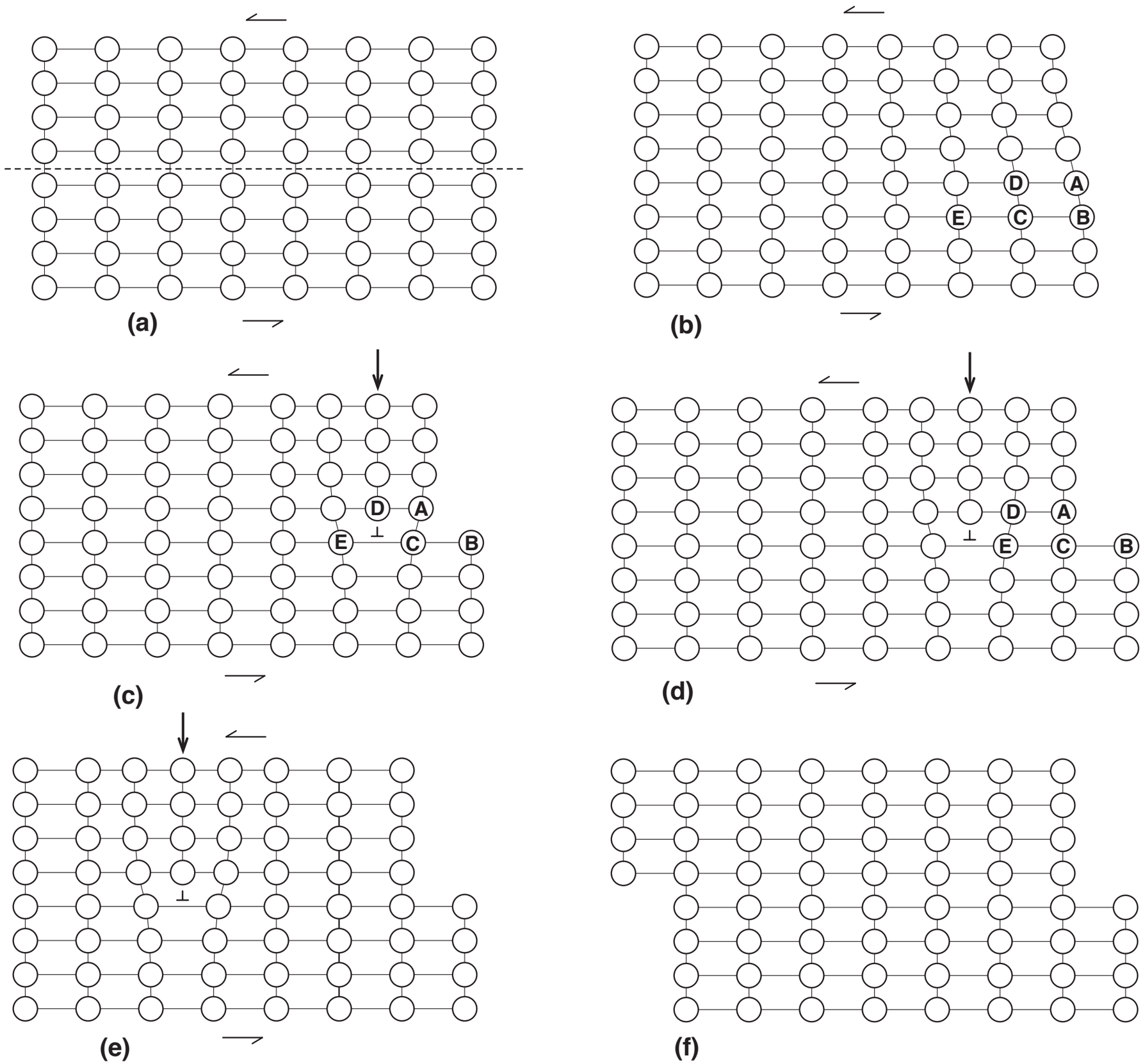
- Quali sono i meccanismi deformativi che producono una deformazione permanente nei cristalli reali;
- in quali condizioni operano questi meccanismi;
- quali relazioni tra velocità di deformazione e stress (reologia) sono associate ai diversi meccanismi deformativi;
- quali microstrutture in una roccia riflettono il meccanismo deformativo che le ha prodotte;
- quali sono le condizioni (P, T, presenza di fluidi, ecc.) durante l'evento deformativo.

Difetti lineari: dislocazioni

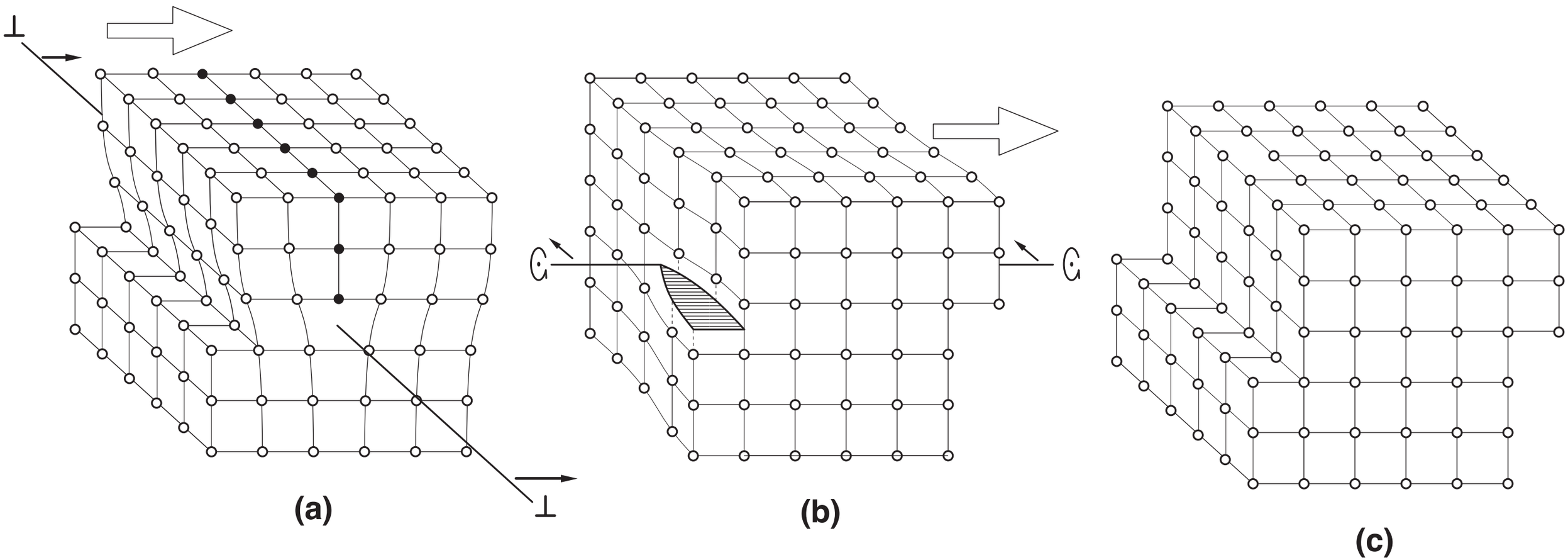




Difetti lineari: dislocazioni



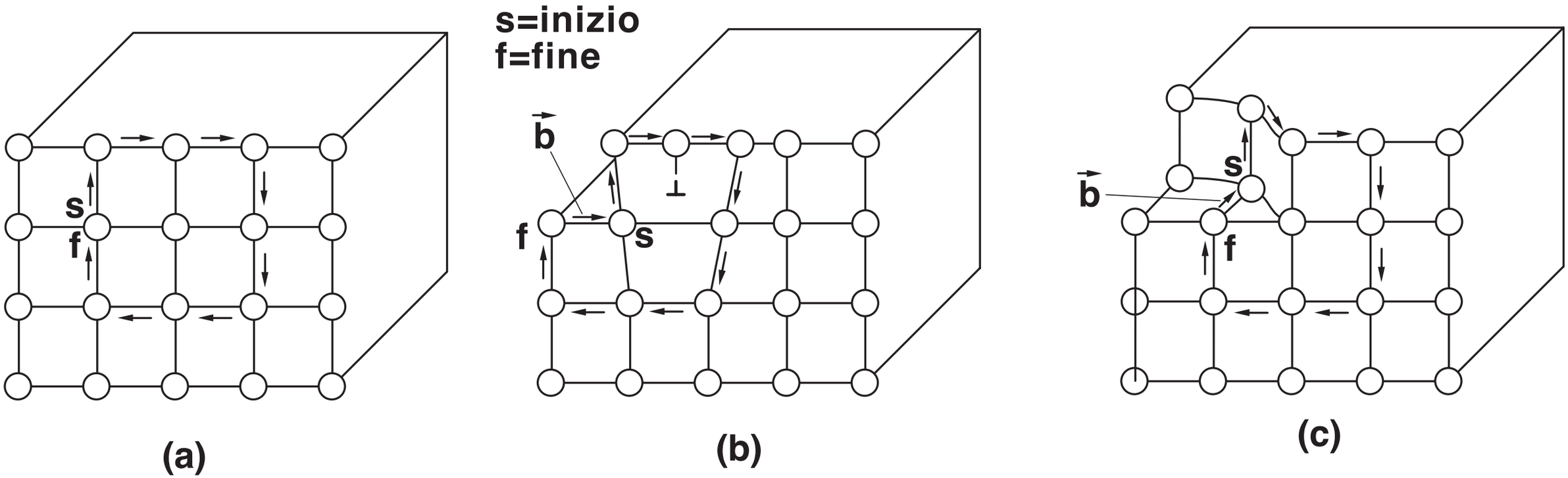
Dislocazioni in tre dimensioni



Disloc. a spigolo Disloc. a vite cristallo deformato

La differenza consiste nella differente orientazione della linea di dislocazione rispetto alla direzione di spostamento del reticolo cristallino.

Vettore di Burger



Il vettore di Burger per una qualsiasi dislocazione può essere definito contando lo stesso numero di unità cristallografiche lungo un percorso chiuso attorno alla dislocazione.

Quando è presente una dislocazione, il punto di partenza e di arrivo non coincidono, il vettore che unisce questi due punti è il vettore di Burger.

Vettore di Burger

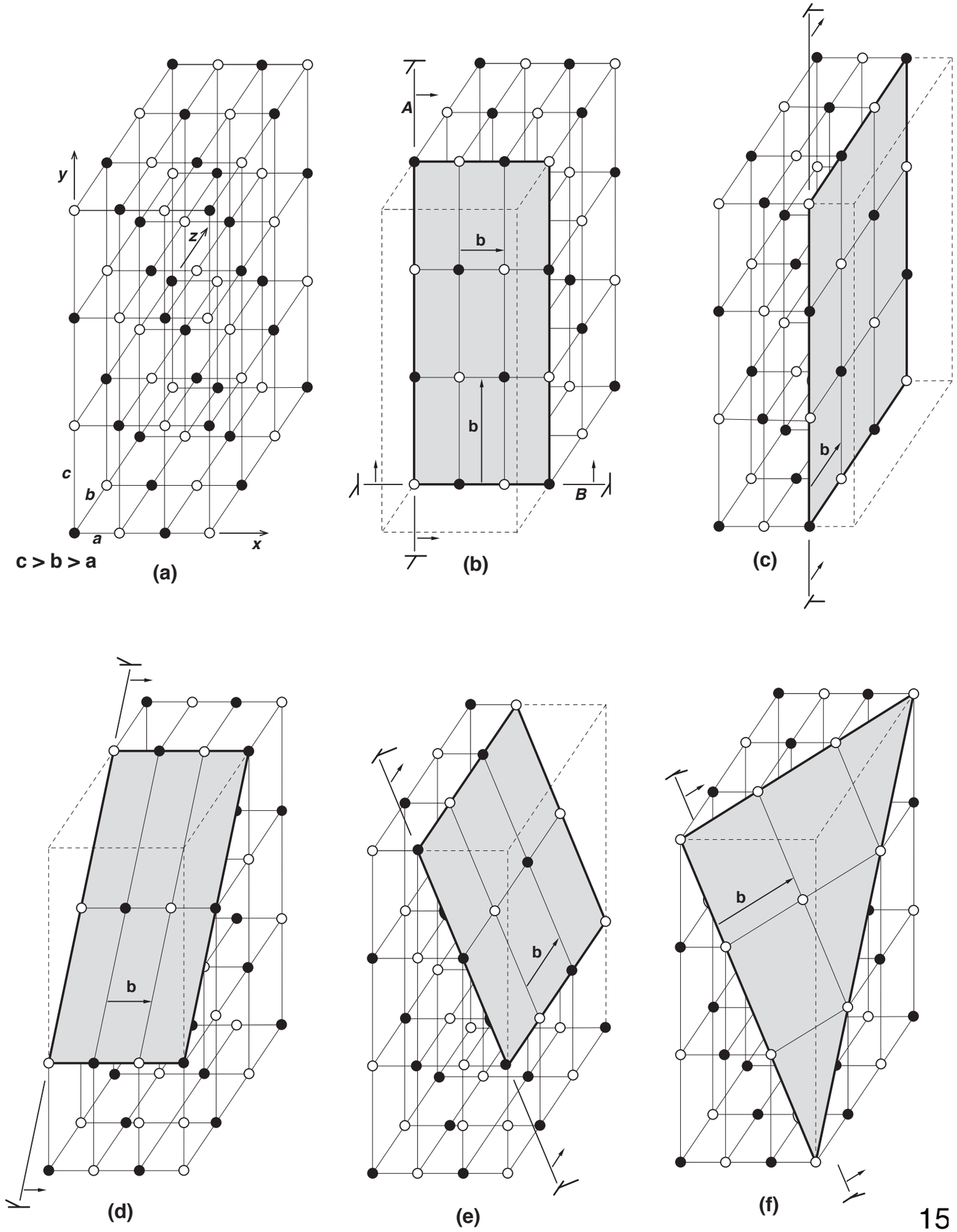
- varia nei minerali a seconda del piano reticolare su cui si ha scorrimento
- ha dimensioni uguali alla distanza reticolare minima secondo cui si hanno ripetizioni nel reticolo cristallino

- Il piano reticolare che contiene una dislocazione e il suo vettore di Burger è detto piano di scorrimento (slip plane)
- un piano di scorrimento e il relativo vettore di Burger definiscono un sistema di scorrimento(slip system, glide system)

Attivazione di sistemi di scorrimento

b: vettore di Burger

in grigio: piano di scorrimento



Attivazione di sistemi di scorrimento

- Applicando uno stress ad un cristallo si avrà scorrimento sul piano reticolare (hkl) nella direzione [ukw] su cui è minima l'energia necessaria per lo scorrimento. Preferenzialmente:
- sui piani reticolari su cui si ha il massimo impacchettamento di atomi;
- nella direzione in cui la distanza tra gli atomi è minima (piccolo vettore di Burger);
- nella direzione in cui non vengono a contatto ioni della stessa carica;
- nella direzione in cui si hanno legami che possono essere rotti con il minimo impiego di energia (es. legami covalenti).

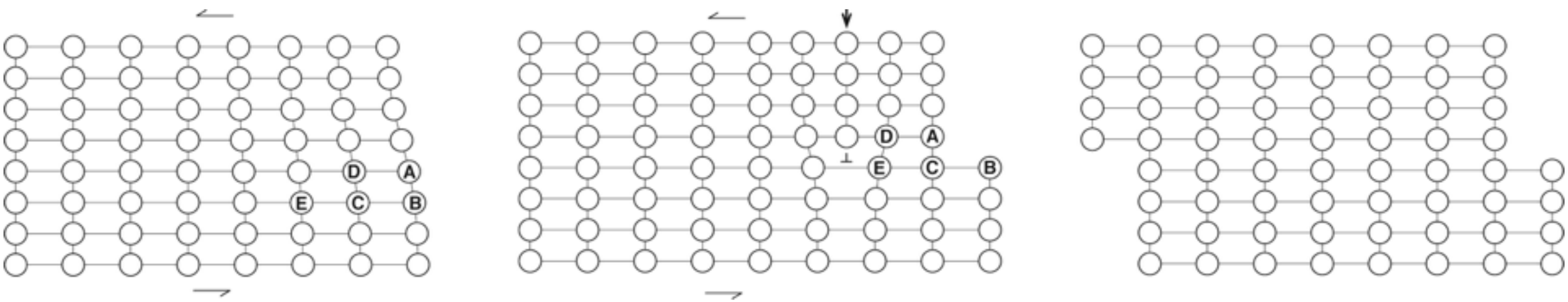
Sistemi di scorrimento

Principali sistemi di scorrimento nei minerali più comuni. Notazione di Miller-Bravais, per la calcite riferimento alla cella esagonale morfologica. Con la notazione $\langle r : f \rangle$ si indica una direzione cristallografica individuata dall'intersezione di due piani (piano r e piano f).

Minerale	Piano di scorrimento	Direzione di scorrimento
Quarzo	$(0001)(c)$ *basale*	$\langle \bar{1}2\bar{1}0 \rangle \langle a \rangle$
	$\{10\bar{1}0\}\{m\}$ *prismi*	$\langle \bar{1}2\bar{1}0 \rangle \langle a \rangle$, $\langle \bar{1}2\bar{1}3 \langle c+a \rangle$
	$\{10\bar{1}1\}\{r\}$ *rombi positivi*	$\langle \bar{1}2\bar{1}0 \rangle \langle a \rangle$, $\langle \bar{1}\bar{1}23 \rangle \langle c+a \rangle$
	$\{01\bar{1}1\}\{z\}$ *rombi negativi*	$\langle \bar{1}2\bar{1}0 \rangle \langle a \rangle$, $\langle \bar{1}\bar{1}23 \rangle \langle c+a \rangle$
Calcite	$\{\bar{1}012\}\{e_1\}$ *geminazione*	$\langle 10\bar{1}1 \rangle \langle e_1 : a_2 \rangle$
	$\{10\bar{1}1\}\{r_1\}$	$\langle \bar{1}012 \rangle \langle r_1 : f_2 \rangle$
	$\{\bar{2}021\}\{f_1\}$	$\langle 1\bar{1}02 \rangle \langle r_2 : f_3 \rangle$
Mica	(001)	$\langle 110 \rangle$, $[100]$
Alite	$\{110\}$	$\langle 1\bar{1}0 \rangle$
	(001)	$\langle 1\bar{1}0 \rangle$
Olivina	(100)	$[001]$
	$\{110\}$	$[001]$
	(010)	$[100]$

Movimento di dislocazioni

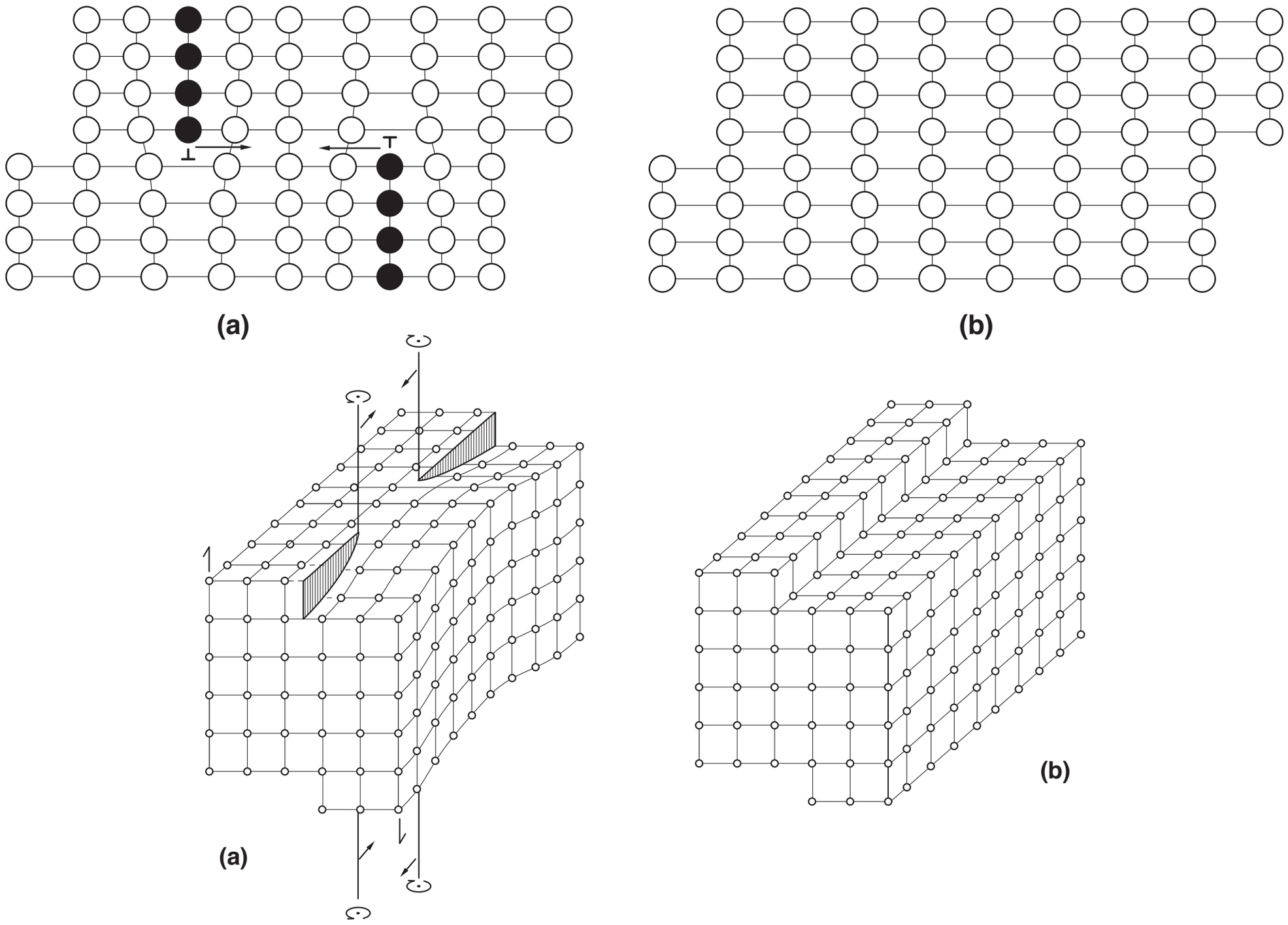
- E' il movimento di dislocazioni che produce variazioni di forma di cristalli a seguito di deformazione
- Quando una dislocazione esce da un cristallo questo ha variato la sua forma (deformazione)
- Maggiore è il numero delle dislocazioni che escono da un cristallo e tanto maggiore sarà la variazione della forma esterna del cristallo



(a) (b) (c)

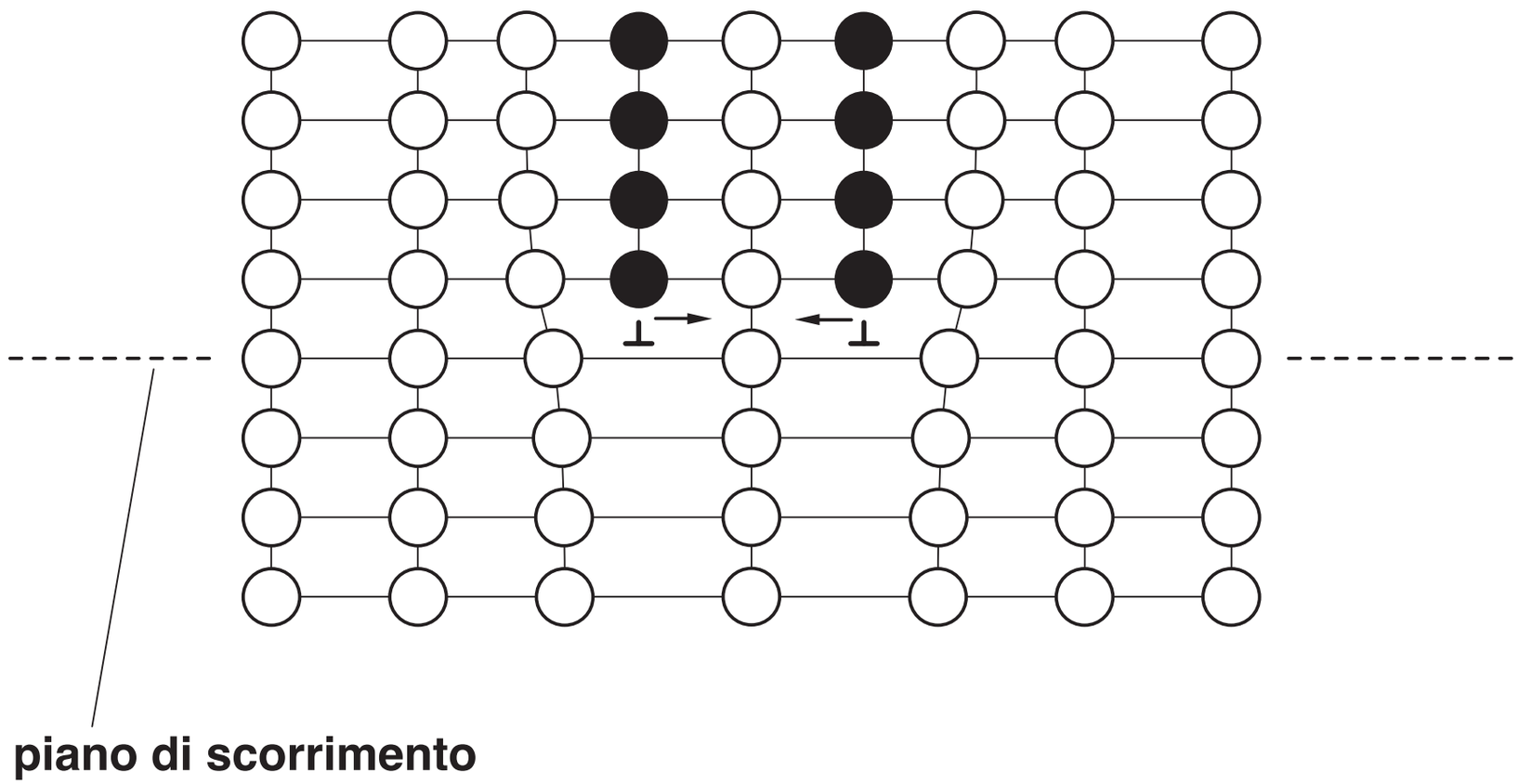
Interazioni tra dislocazioni

Dislocazioni di segno opposto che si muovo sul solito piano reticolare, si annullano.



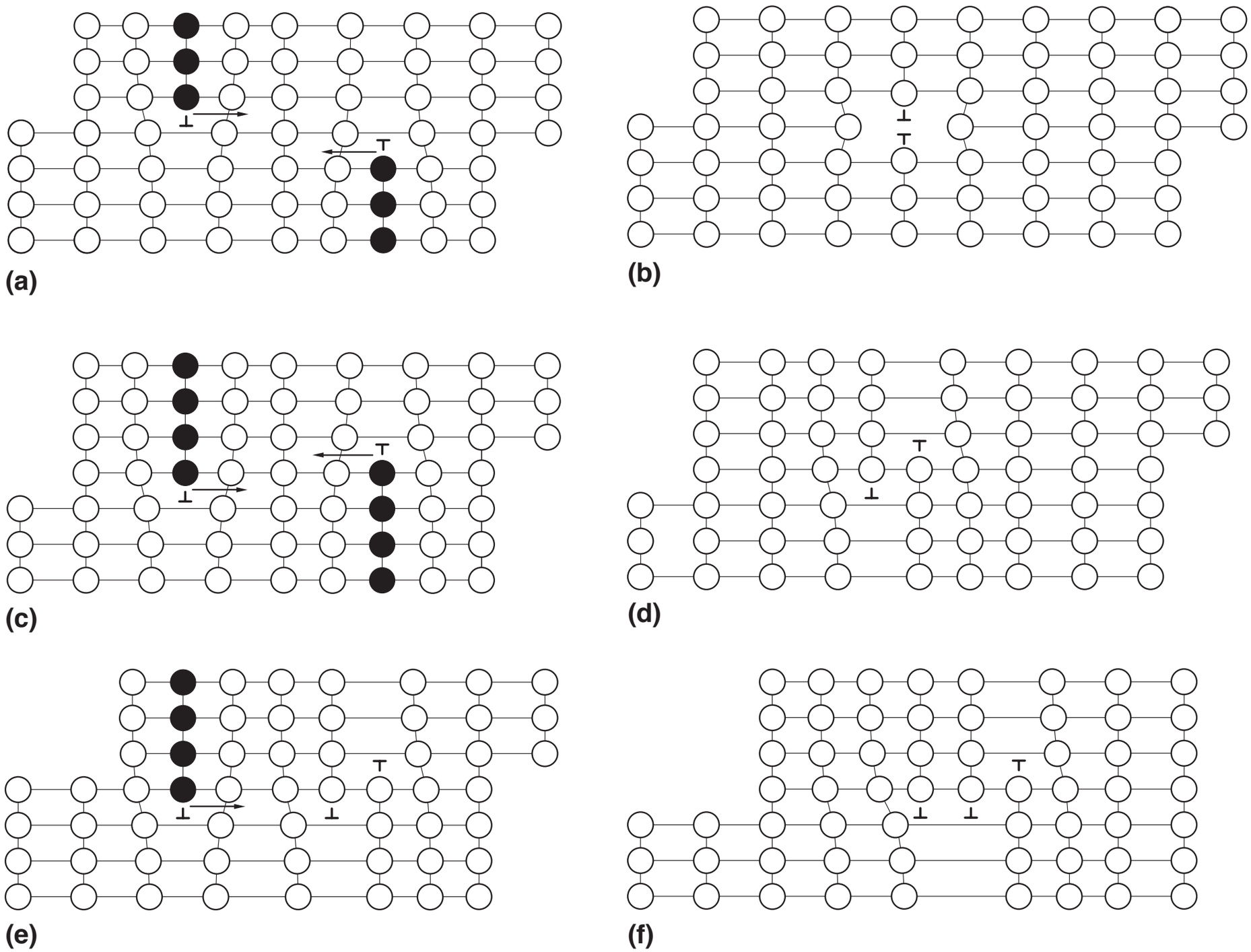
Interazioni tra dislocazioni

Dislocazioni del solito segno che si muovo sul solito piano reticolare, si bloccano.



Interazioni tra dislocazioni

Dislocazioni del solito segno o di segno opposto che si muovo su piani reticolari differenti, si bloccano.

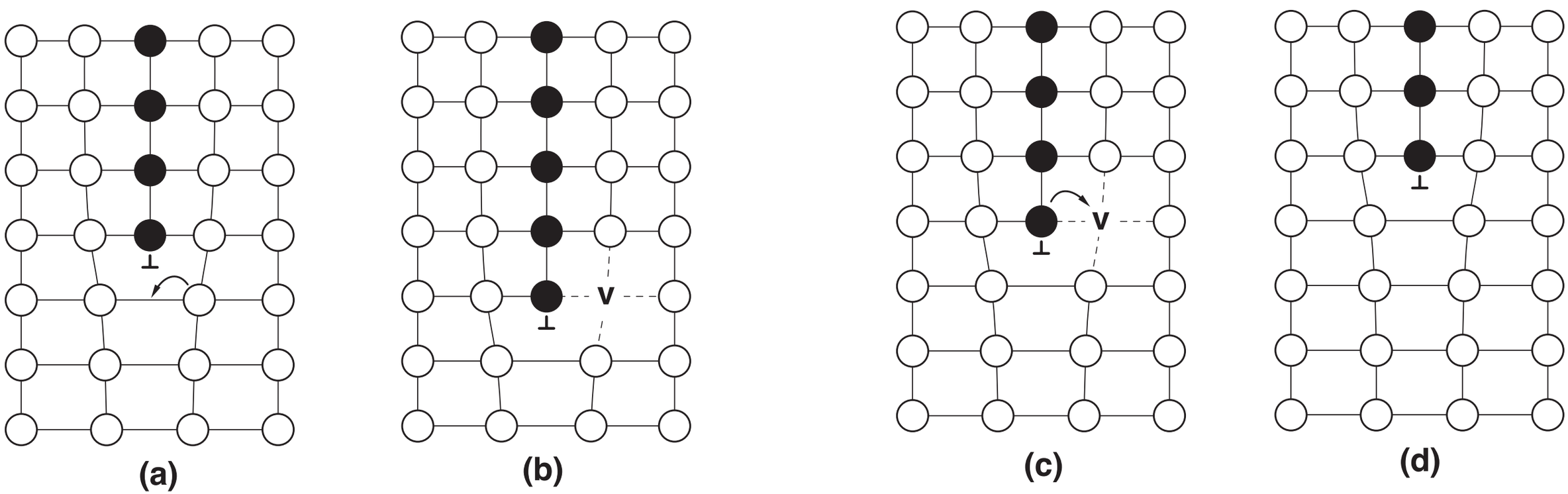


Interazioni tra dislocazioni

- solo interazioni tra dislocazioni di segno opposto che si muovono nel solito piano reticolare portano ad un cristallo privo di difetti che ha variato la sua forma esterna
- negli altri casi si producono reticoli fortemente deformati e ricchi di difetti in cui il successivo movimento di dislocazioni è molto difficile;
- in questi casi continuando ad applicare uno stress ad un cristallo si formano sempre nuove dislocazioni che se non si annullano tra loro e non possono attraversare completamente il cristallo, portano ad un reticolo cristallino sempre più distorto senza che il cristallo cambi la sua forma esterna (work hardening)

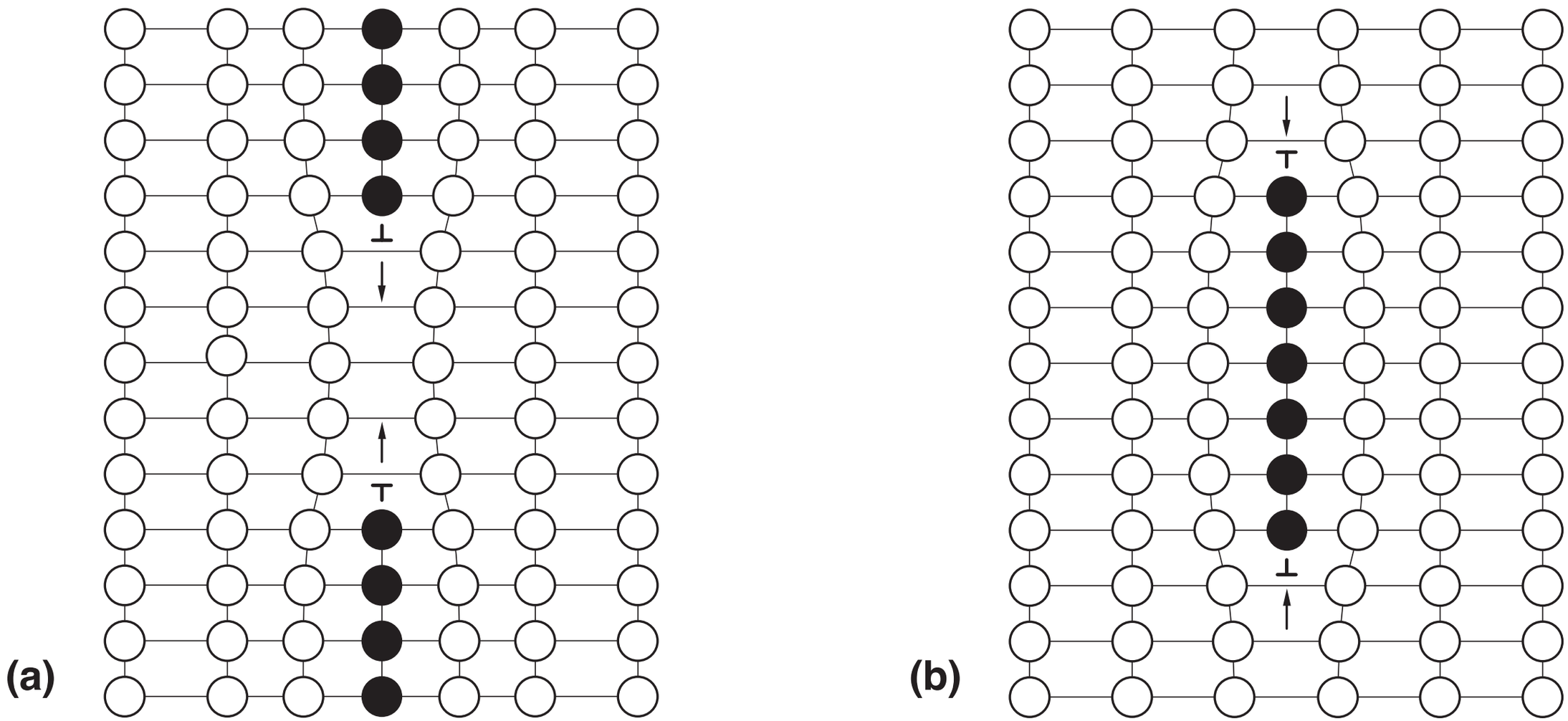
Climb di dislocazioni

- una dislocazione può spostarsi ortogonalmente (climb) rispetto al piano di scorrimento mediante diffusione, cioè con inserimento o rimozione di un atomo alla terminazione del piano supplementare (extra half-plane)
- temperatura maggiore



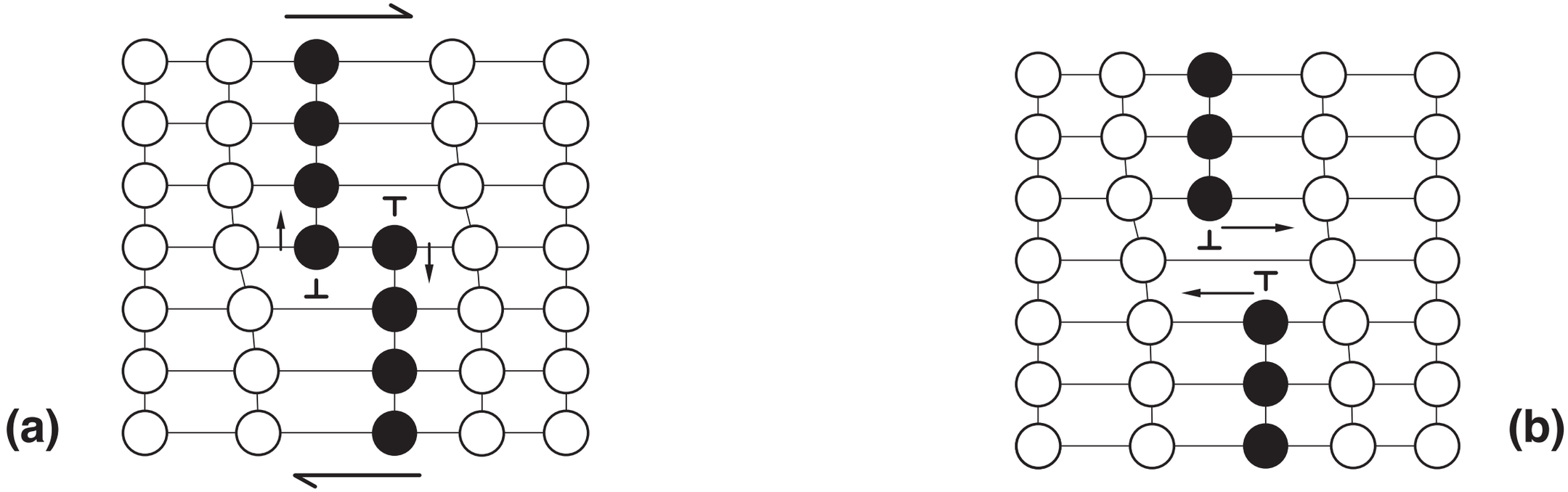
Climb di dislocazioni

- climb di dislocazioni può portare all'eliminazione di difetti nel reticolo cristallino.



Climb di dislocazioni

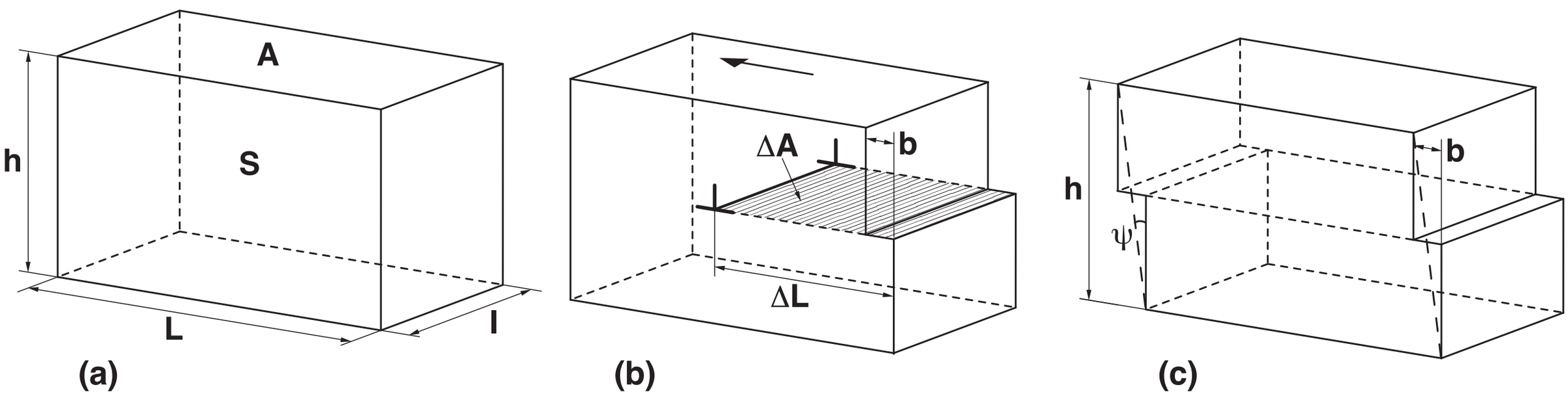
- Con il meccanismo di climb dislocazioni il cui movimento è difficoltoso, o che risultano bloccate su alcuni piani reticolari, possono passare su altri piani reticolari su cui il movimento è più facile.



Dislocazioni e strain

Quando la dislocazione ha attraversato tutto il cristallo questo avrà cambiato la sua forma esterna lo strain di taglio risultante sarà:

$$\gamma = \tan\psi = \frac{b}{h}$$



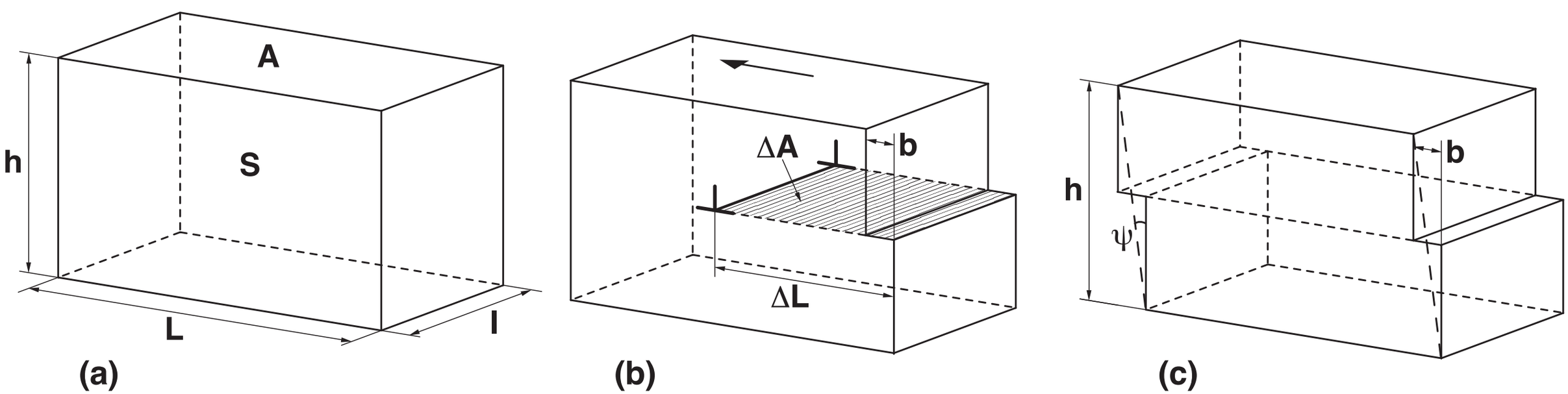
Dislocazioni e strain

Nel caso siano presenti N dislocazioni

$$\gamma = \frac{N}{S}\, b\, \Delta L$$

La densità di dislocazioni è definita come la lunghezza complessiva delle linee di dislocazione presenti per unità di volume oppure come il numero di dislocazioni per unità di superficie, cioè:

$$\rho = \frac{N}{S} \quad \text{e quindi} \quad \gamma = \rho b \Delta L$$



Dislocazioni e strain

Definendo la velocità di deformazione:

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial \gamma}{\partial t}$$

si ricava:

$$\dot{\gamma} = b\frac{\partial}{\partial t}(\rho \Delta L) = b\left(\Delta L \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial \Delta L}{\partial t}\right)$$

dove:

$$\frac{\partial \Delta L}{\partial t} = v$$

è la velocità di movimento delle dislocazioni.

Nel caso di una deformazione omogenea e di un flusso *steady state* continuo senza l'applicazione di forze impulsive, si può considerare la densità di dislocazioni costante ($\partial \rho / \partial t = 0$) e di conseguenza:

$$\boxed{\dot{\gamma} = \rho\, b\, v} \tag{1.9}$$

Dislocazioni e strain

$$\dot{\gamma} = \rho\, b\, v$$

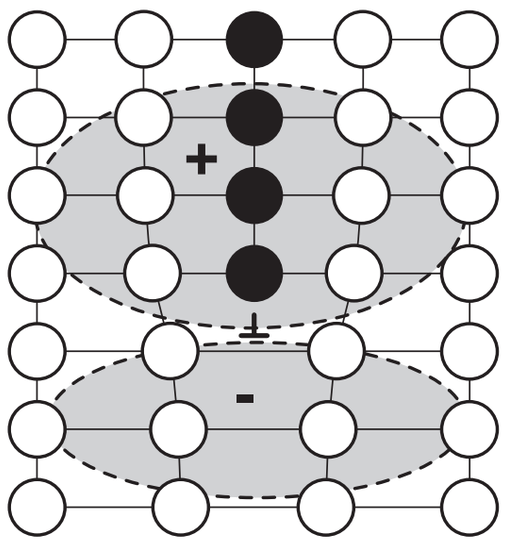
<u>Equazione di Orowan</u>

stabilisce che la velocità di deformazione di un cristallo è funzione:

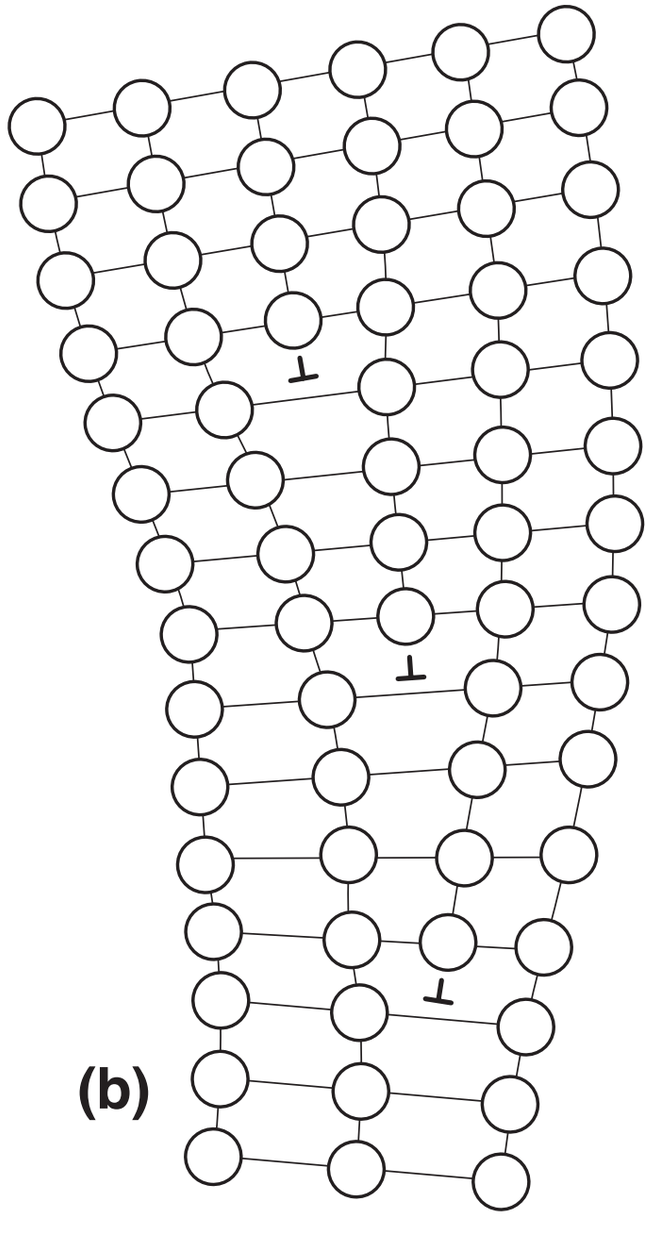
- della densità di dislocazioni presenti,
- del vettore di Burger
- della velocità con cui le dislocazioni si muovono all'interno del cristallo.

Difetti planari

- Allineamento di dislocazioni: situazione energeticamente più favorevole

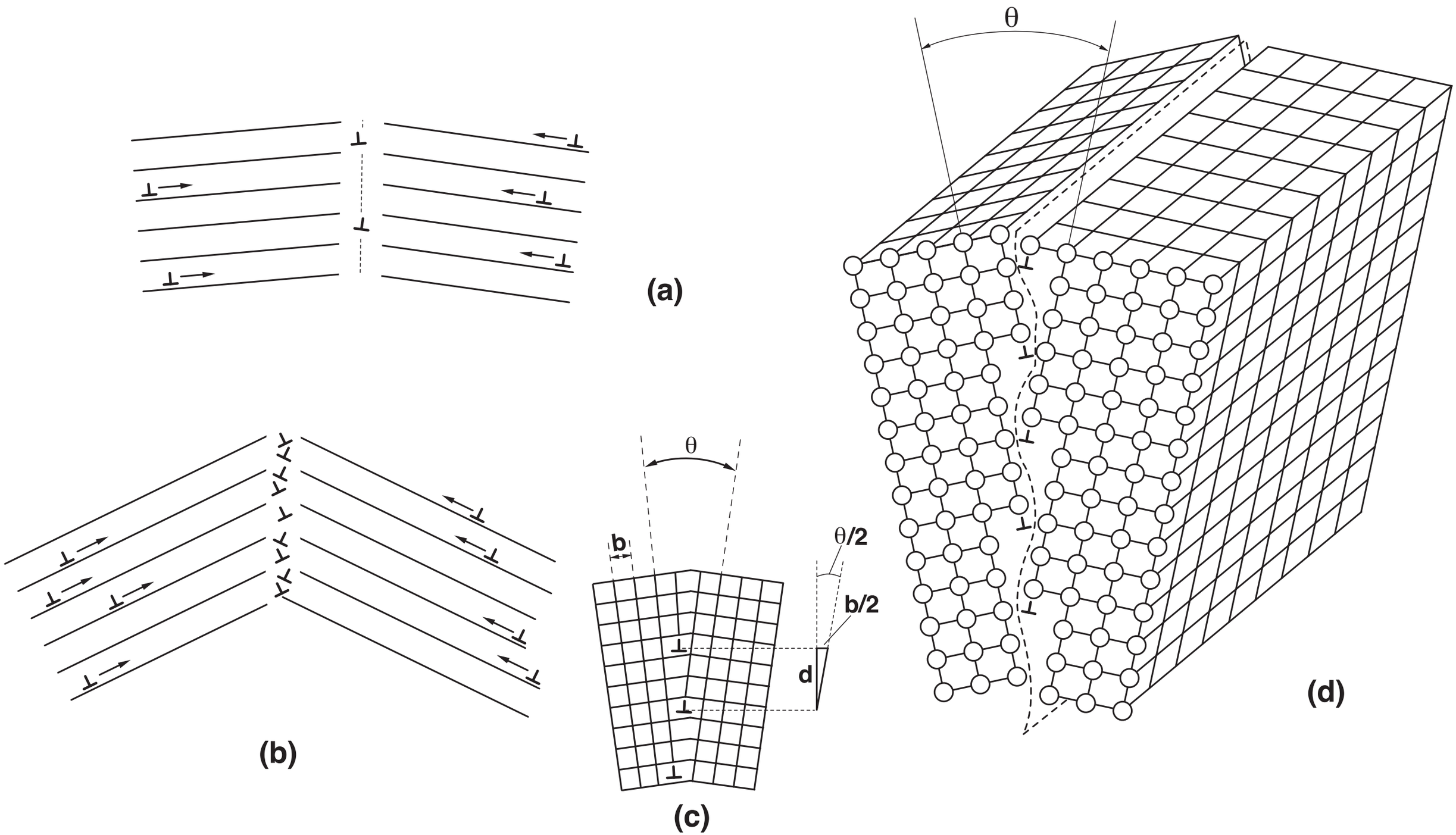


(a)

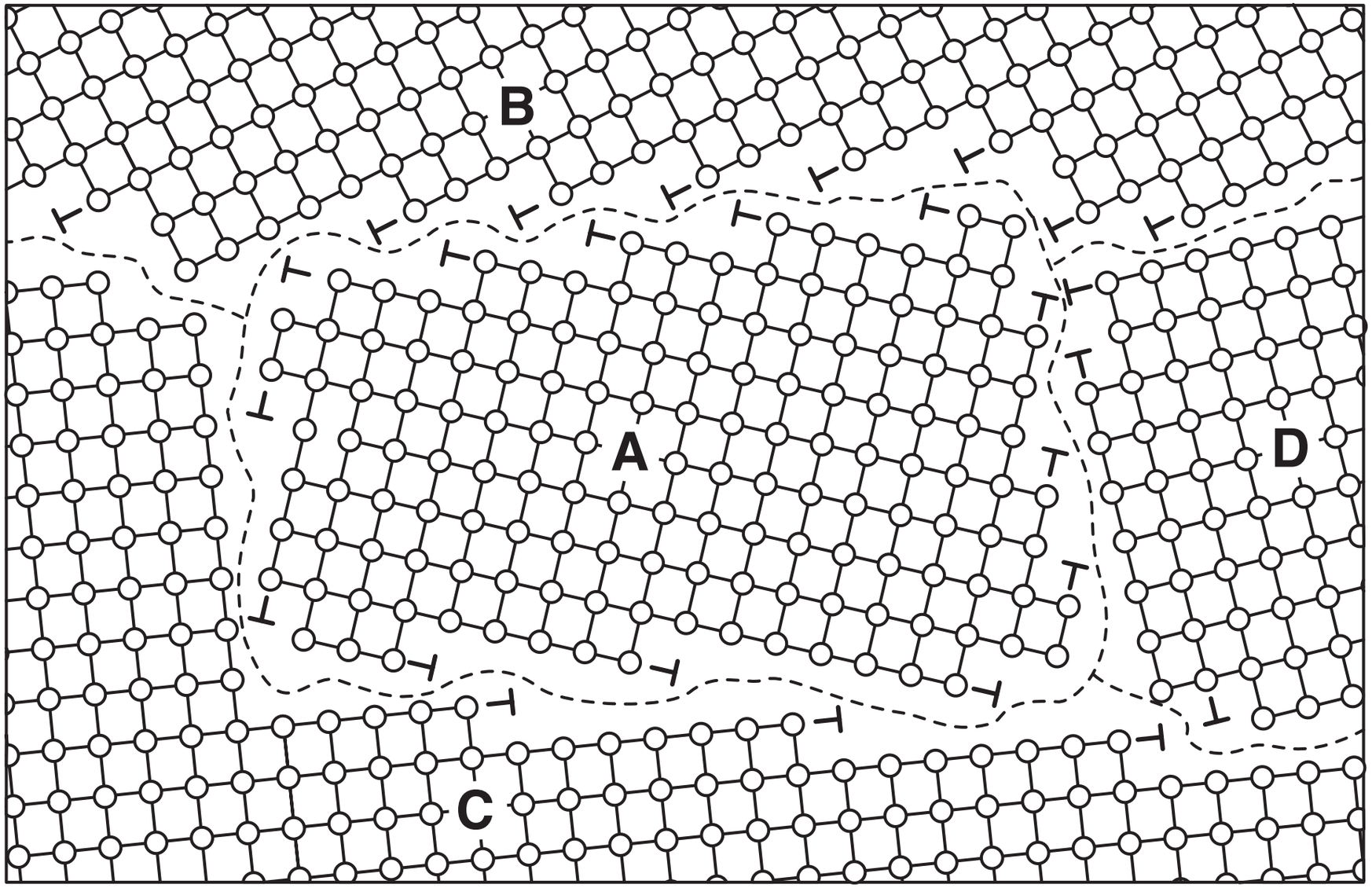


(b)

Difetti planari

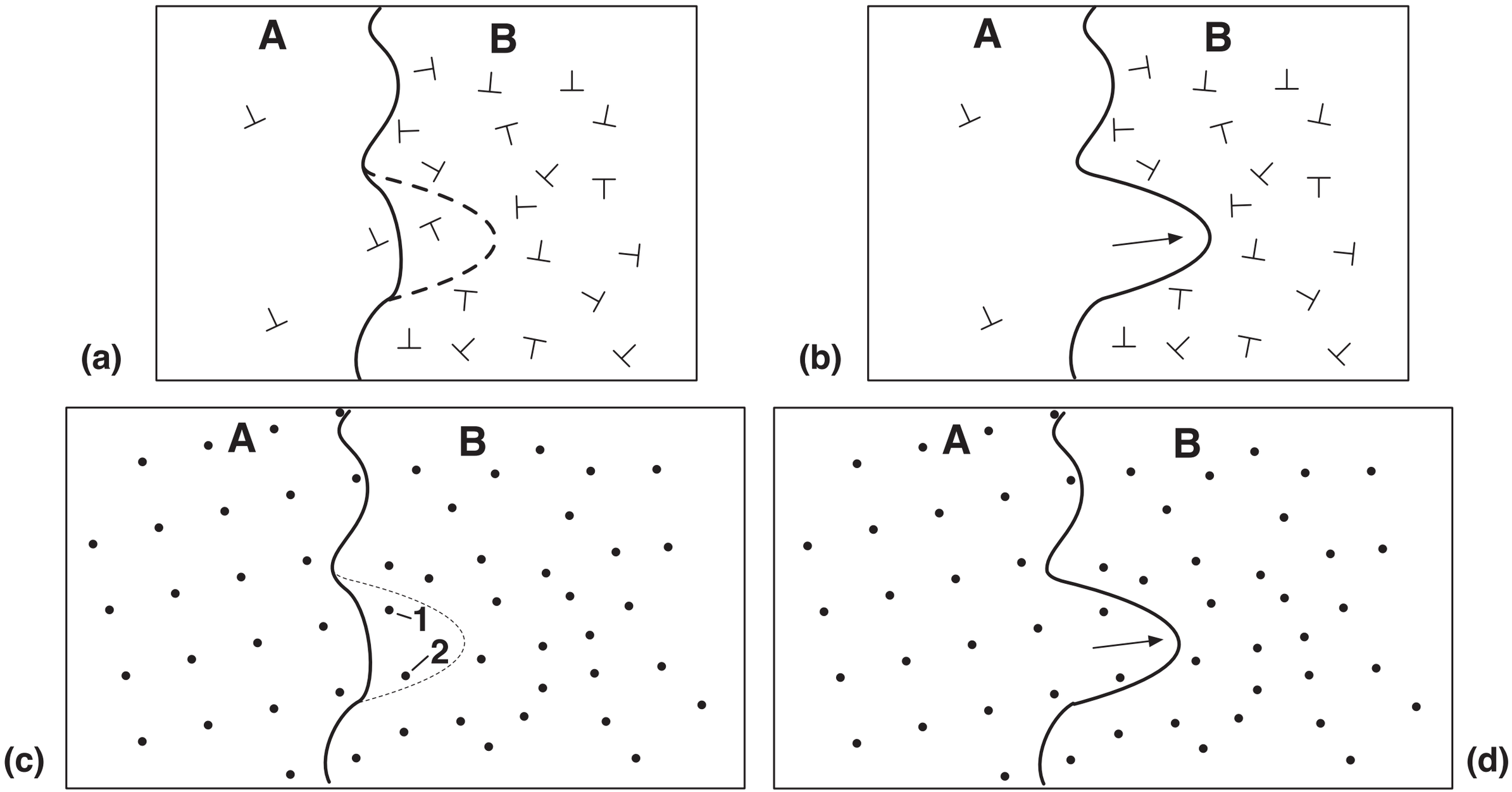
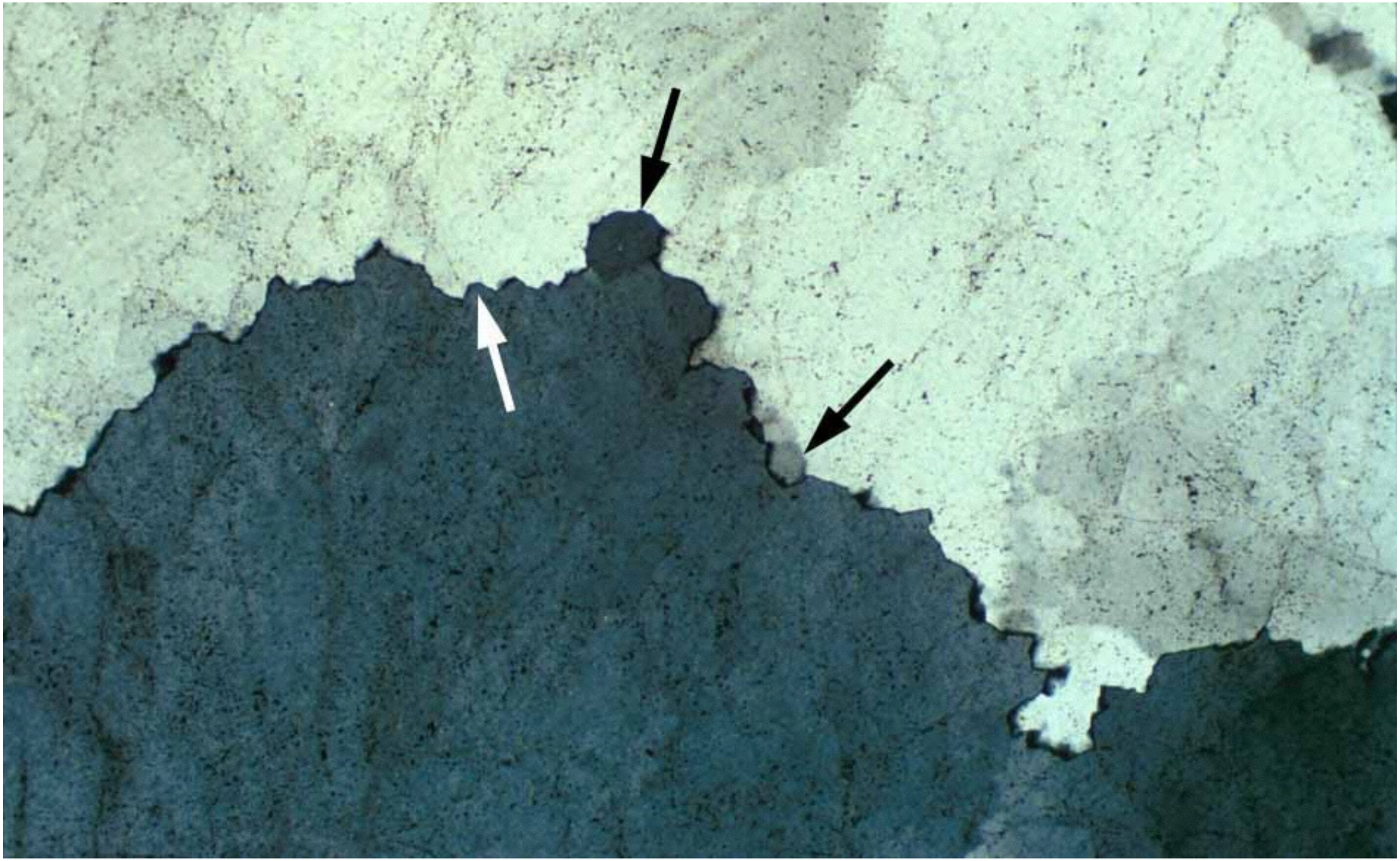


Difetti planari



Ricristallizzazione per rotazione (poligonizzazione)

Migrazione dei limiti tra i granuli



Migrazione dei limiti tra i granuli