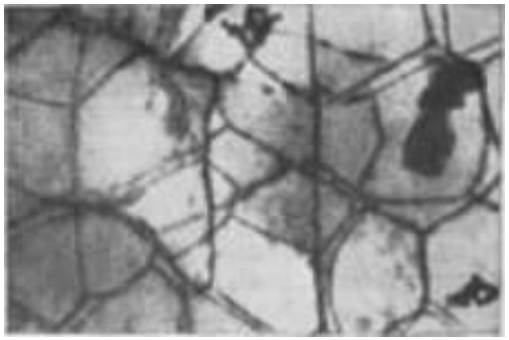
Змішані дислокації

- Дислокація не може закінчитися усередині кристала, не з'єднуючись з іншою дислокацією. Це випливає з того, що границя зони зсуву завжди є замкнутою лінією. Частина цієї границі може проходити по зовнішній поверхні кристала

- Лінія дислокації повинна замикатися всередині кристала або закінчуватися на його поверхні. Тут можливі найрізноманітніші варіанти



Ge

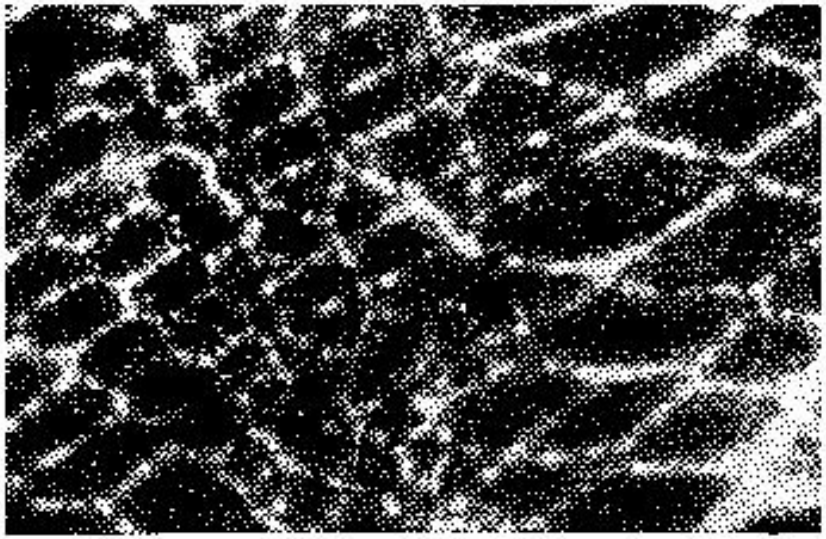


Рис. 2.15

«Паутина» дислокаций в монокристалле NaCl, декорированная каплями серебра. Увеличение 800.

Змішані дислокації

- На рис. 2.16, *а* лінія дислокації складається з прямих областей **крайової** і **гвинтової** орієнтації, **перпендикулярних** і **паралельних** вектору зсуву відповідно. Це окремий випадок.
- У більш загальному випадку у площині ковзання **лінія дислокації — крива** (рис. 2.16, *б*).
- Окремі малі області цієї кривої мають крайову або гвинтову орієнтацію, але більша її частина не перпендикулярна і не паралельна вектору зсуву; в останньому випадку ми маємо справу з **дислокацією змішаної орієнтації**

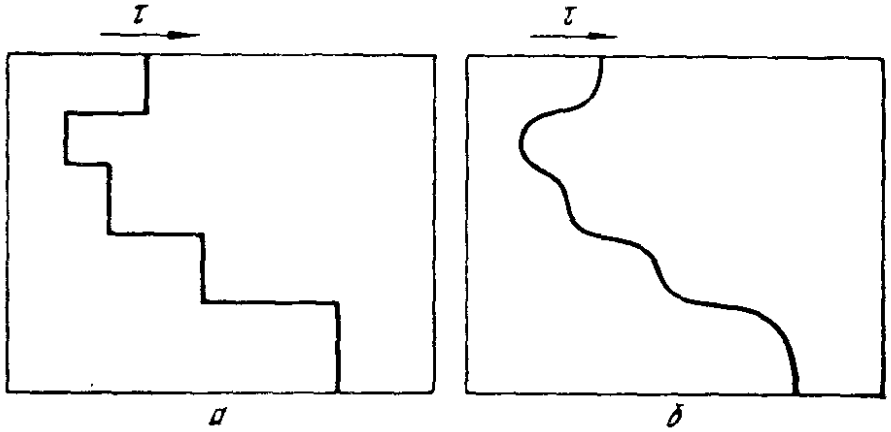


Рис. 2.16. Крайові і гвинтові дислокації утворюють одну безупинну ламану (а) або плавну (б) лінію усередині кристала. Плавна лінія містить також області змішаної орієнтації

Схема утворення змішаної дислокації

- На рис. 2.17 лінія *АС* обмежує всередині кристала зону зсуву *АВС.* Заштриховано сходинку, що утворилася на передній грані кристала при зсуві верхньої його частини відносно нижньої по площині *АВС*

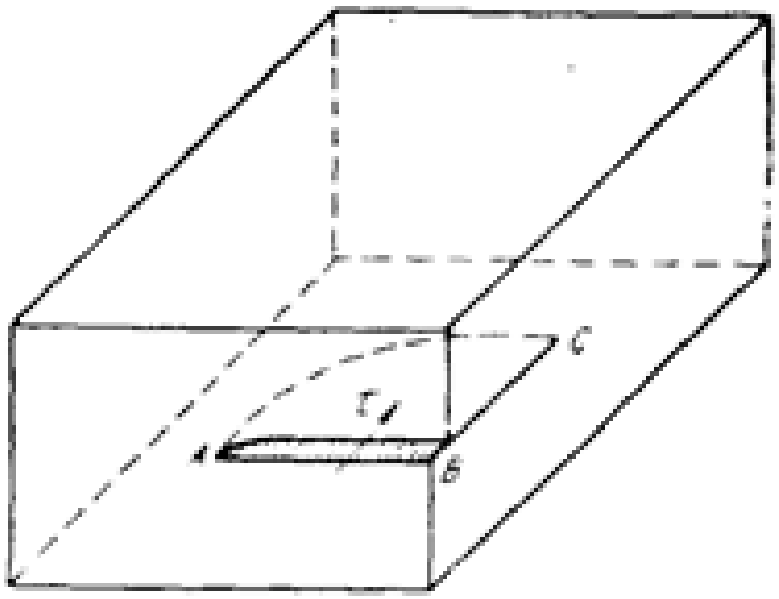


Рис. 2.17. Зсув, що утворив змішану дислокацію *АС*

- ***АС – лінія змішаної дислокації***

Атомна схема змішаної дислокації

- Поблизу точки *A* **на ділянці *AA'*** дислокація **паралельна** вектору зсуву і, отже, має **гвинтову** орієнтацію. Поблизу точки *C* дислокація **перпендикулярна** вектору зсуву і, отже, має **крайову** орієнтацію. Поблизу точки *C* у верхній частині кристала (над площиною креслення) є згущення вертикальних атомних площин і екстраплощина, що розглядається зверху. Тут її видно у вигляді ланцюжка світлих **кружків *CC'***, усередині яких немає чорних кружків. Цей ланцюжок атомів є краєм екстраплощини. Поблизу точки *C'* екстраплощина скривлюється і з'єднується з вертикальною площиною, що знаходиться під площиною ковзання, тобто екстраплощина тут перестає бути неповною атомною площиною (екстраплощиною), і дислокація втрачає крайову орієнтацію. У **проміжку між крайовою ділянкою поблизу точки *C* і гвинтовою поблизу точки *A* дислокація має змішану орієнтацію**, проміжну між крайовою і гвинтовою

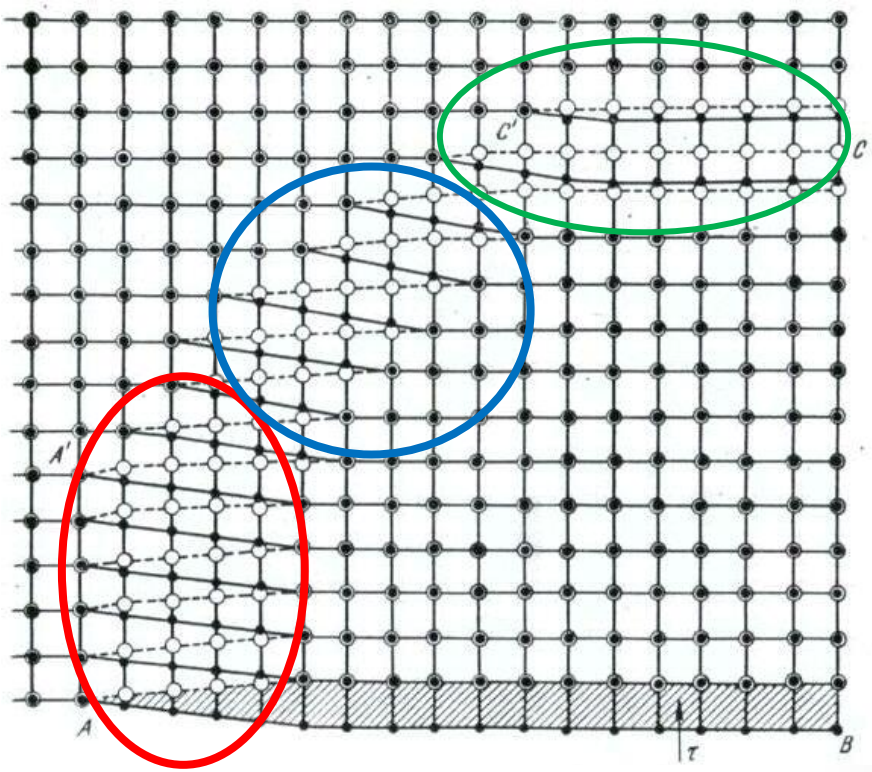
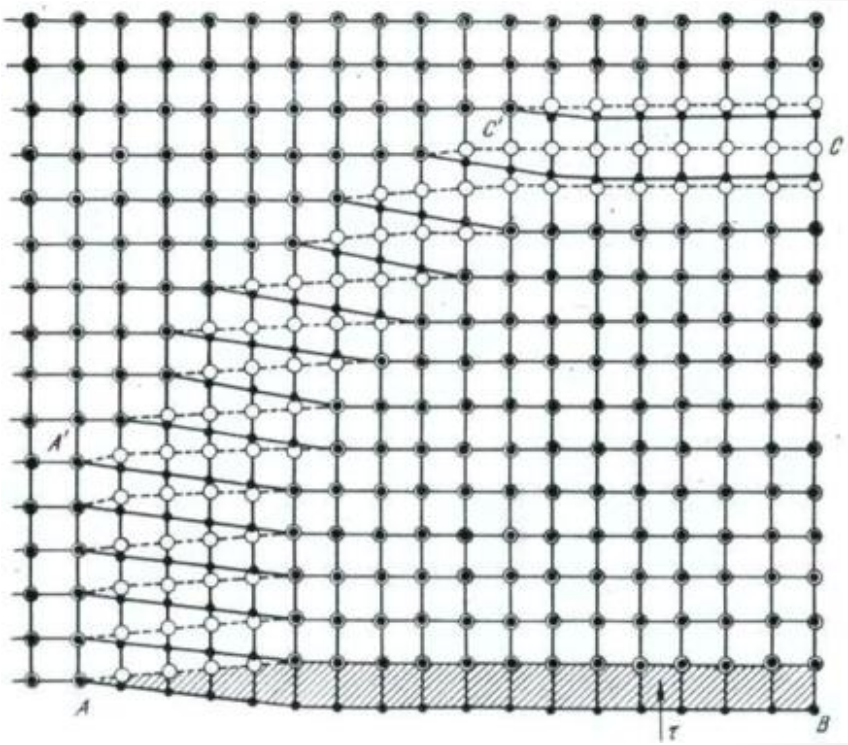


Рис. 2.18 Розташування атомів в області змішаної дислокації.
Схема отримана при розгляді на рис. 2.17 площини *ABC* з боку верхньої грані кристала.
Площина креслення є площиною ковзання; чорні кружки позначають атоми під цією площиною, а білі — над нею

Ковзання змішаної дислокації

- Під дією прикладених дотичних напруг τ зона зсуву, заштрихована на рис. 2.18, розширюється. Ділянка дислокації з **крайовою** орієнтацією поблизу точки *C* сковзає **в напрямку прикладеної сили**, а ділянка з **гвинтовою** орієнтацією поблизу точки *A* - **перпендикулярно цьому напрямку**



Ковзання змішаної дислокації

- Коли вся лінія змішаної дислокації вийде на зовнішні грані, верхня частина кристала опиниться зсунутою відносно нижньої в напрямку діючих дотичних напруг на один період гратки. Ясно, що в загальному випадку окремі ділянки змішаної дислокації виходять на поверхню кристала неодночасно

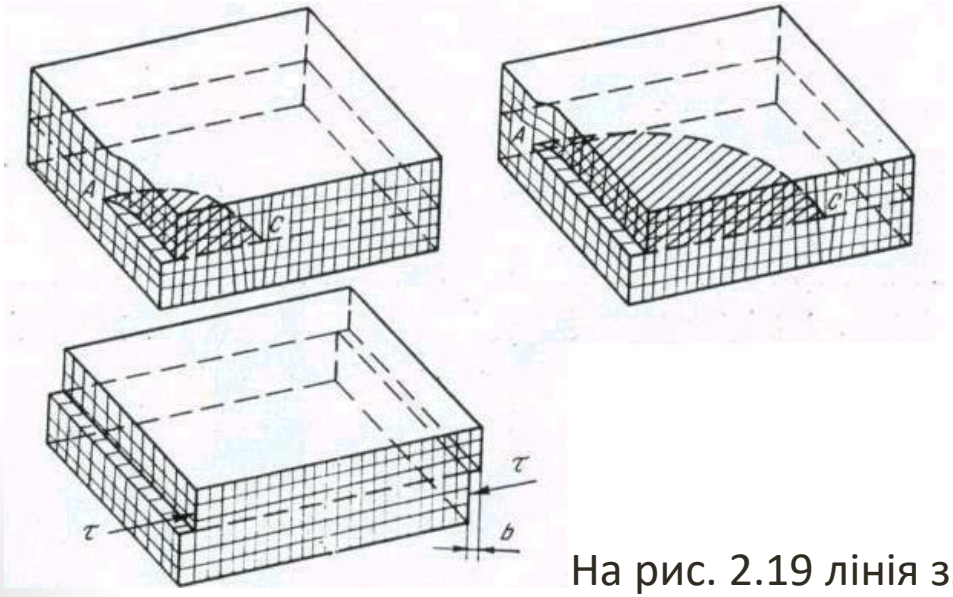


Рис. 2.19 При ковзанні змішаної дислокації *AC* через весь кристал верхня частина його зсунулася відносно нижньої на одну міжатомну відстань

На рис. 2.19 лінія змішаної дислокації закінчується на гранях кристала

Лінія змішаної дислокації

- Лінія дислокації може утворювати замкнуті петлі всередині кристала.
- Окремі ділянки ***дислокаційної петлі*** мають **крайову** або **гвинтову** орієнтацію, а більша частина — **змішану орієнтацію**

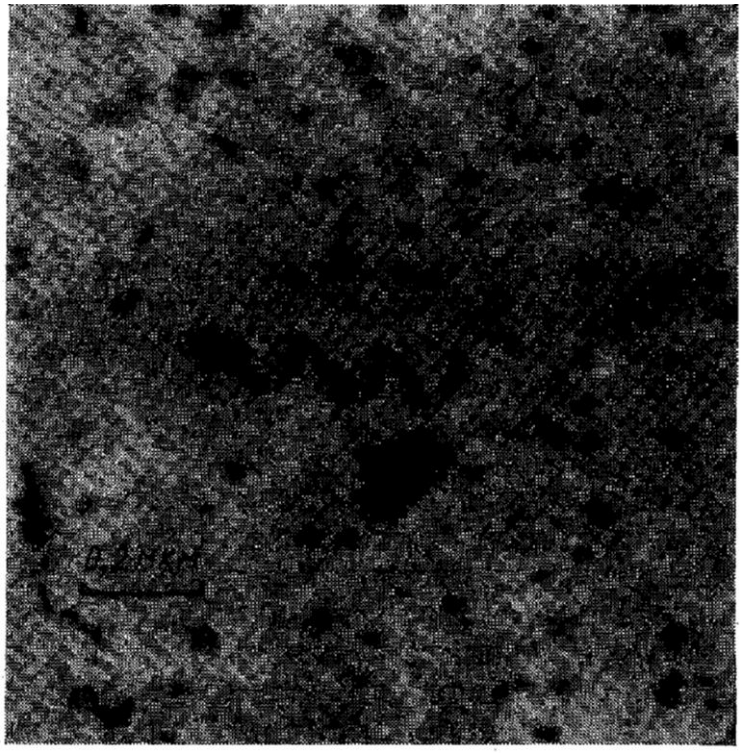


Рис. 12. Геликоидальная дислокация в чистом алюминии после закалки и старения при 20° С [46].

Рис. 2.20

Ковзання змішаної дислокації

- Плоска петля змішаної дислокації, як і будь-яка дислокація, є границею зони зсуву.
- Якщо вектор зсуву знаходиться в площині петлі, то петля відокремлює область площини ковзання усередині неї, де зсув уже відбувся, від області, що лежить поза петлею і ще не охоплена зсувом. Ковзання розвивається при **розширенні петлі**.
- Можливий і протилежний випадок, коли область, де зсув уже відбувся, знаходиться поза петлею дислокації. Ковзання в цьому випадку розвивається при **звуженні** петлі.
- Тут розглянуто дислокаційні петлі, у площині яких знаходиться вектор зсуву. У цій же площині відбувається і ковзання дислокаційної петлі

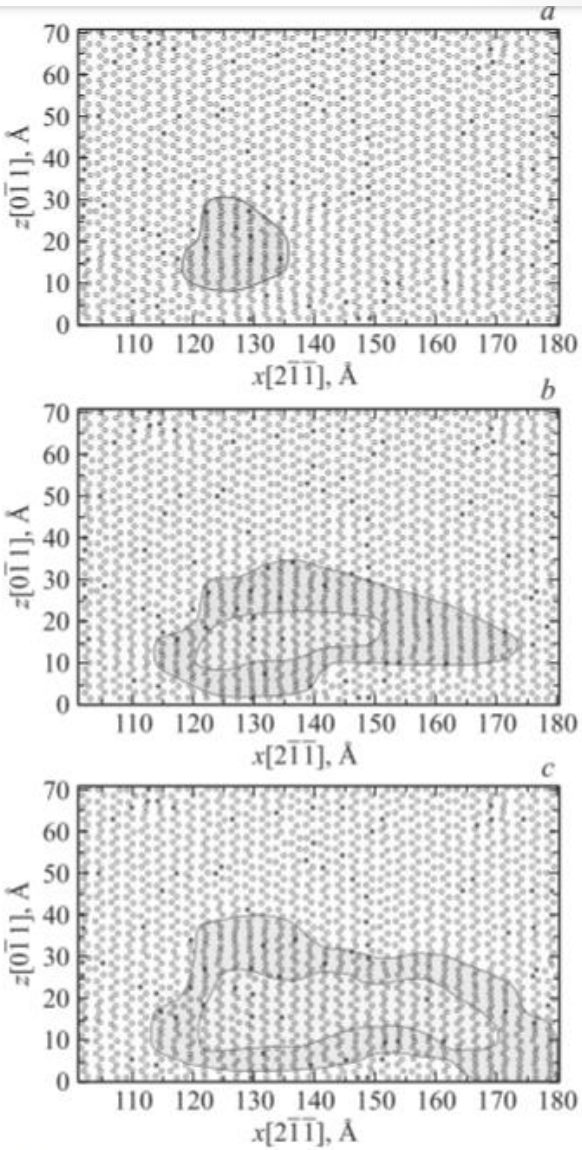


Рис. 2. Зарождение и развитие дислокационной петли в твердом растворе Al с 5 at.% Cu при $T = 300$ K в моменты времени 40 (*a*), 45 (*b*), 71 ps (*c*). Показана плоскость, в которой происходит зарождение дислокации.

Рис. 2.21

Призматична дислокація

- Дислокаційна петля, у якої вектор зсуву не лежить у площині петлі, а є перпендикулярний до її площини, називається **призматичною дислокацією**
- На рис. 2.22 показано результат вдавлювання пуансона прямокутного перетину у бічну грань кристала. Зсув відбувався по чотирьох площинах: *A'ABB'*, *B'BCC'* і т.д.
- **Чотирикутник *ABCD* – границя зони зсуву усередині кристала, тобто він є дислокацією**.
- Вектор зсуву перпендикулярний лінії дислокації і, отже, відрізки *AB*, *BC*, *CD* і *DA* – це **крайові дислокації**.
- При іншій формі пуансона дислокаційна петля може мати форму шестикутника, кола, овалу та ін.
- Оскільки вектор зсуву не лежить у площині дислокаційної петлі, дислокація не може сковзати у цій площині. Будь-яка дислокація може сковзати тільки по поверхні, що містить і дислокаційну лінію і вектор зсуву.

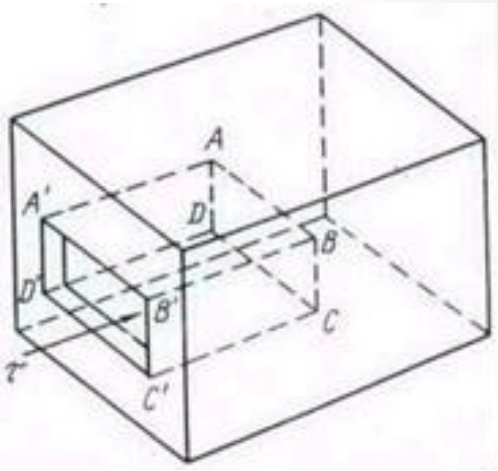


Рис. 2.22. Призматична дислокація ABCD, що утворена вдавлюванням пуансона у бічну поверхню кристала

Призматична дислокація

- Якщо дислокаційна петля має форму багатокутника, то поверхня ковзання являє собою бічну поверхню призми.

- Таке ковзання називають ***призматичним***, а відповідну дислокацію з **крайовою** орієнтацією по всій її довжині — ***призматичною дислокацією***

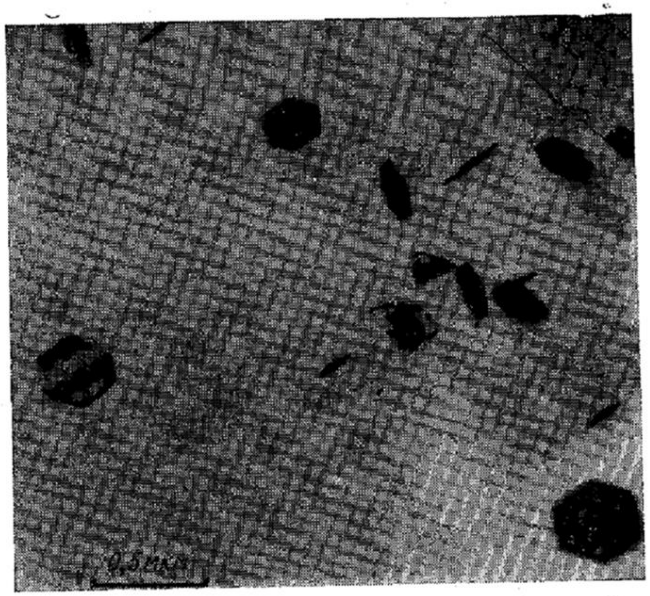


Рис. 2. Сидячие дислокационные петли Франка и призматические петли в чистом алюминии, закаленном с 600° С в силиконовом масле при комнатной температуре.

Рис. 2.23

Утворення призматичної дислокації (скупчення атомів)

- Призматична дислокація — не обов'язково результат зсуву
- Вона може з'явитися при формуванні усередині кристала атомної екстраплощини у вигляді **багатокутника** або **круглого диска**
- Це спостерігається при ядерному опроміненні металів, коли надлишкові **міжвузловинні атоми** утворюють плоскі скупчення. Схему перетину кристала через таку екстраплощину із міжвузловинних атомів показано на рис. 2.24

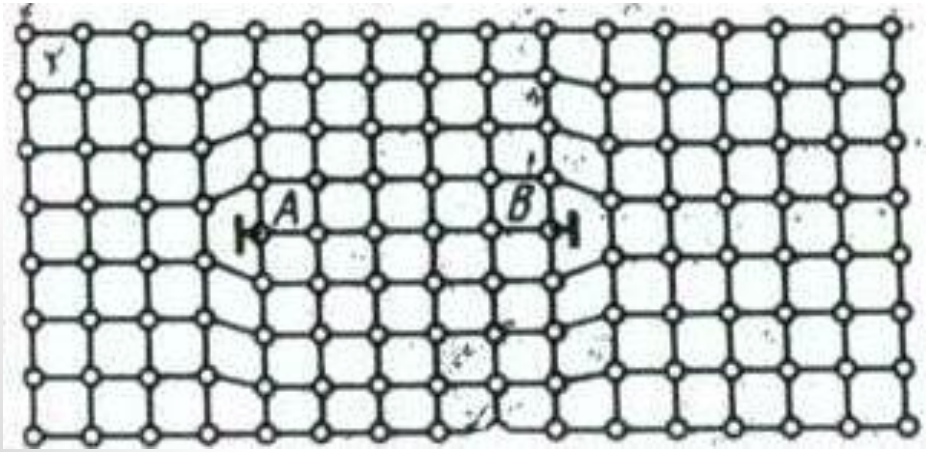


Рис. 2.24. Будова кристала в області призматичної дислокаційної петлі, що є границею плоского горизонтального скупчення міжвузловинних атомів *AB*

Утворення призматичної дислокації (скупчення вакансій)

- Інший механізм утворення призматичних дислокаційних петель – скупчення («конденсація») **гартівних вакансій** у вигляді **вакансійних дисків** на певних кристалографічних площинах

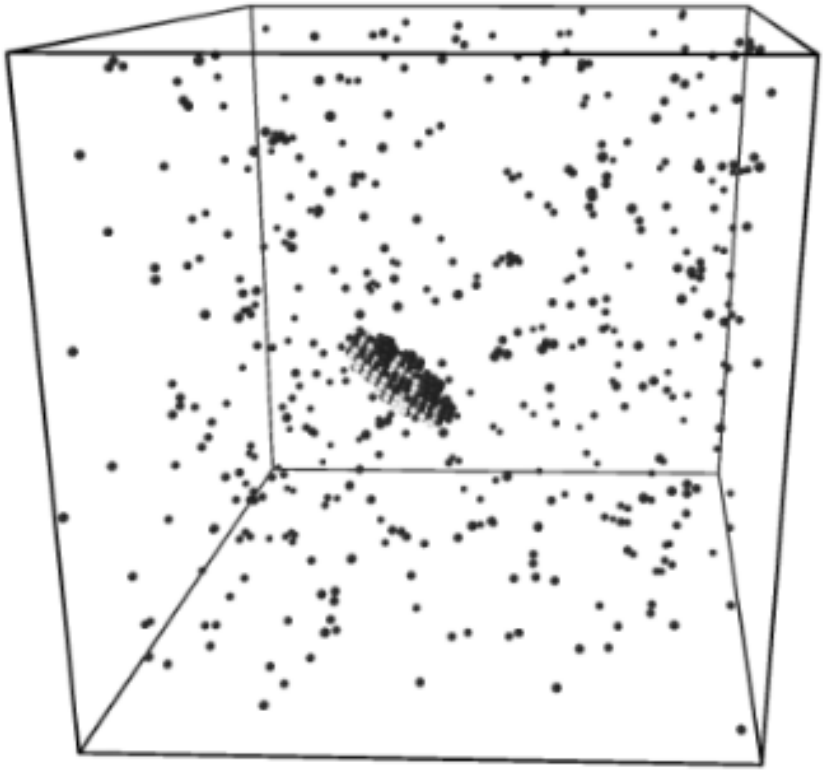


Рис. 2.25. Утворення вакансійного диска

Захлопування вакансійних дисків

- При перевищенні деякого критичного діаметра такий «диск порожнечі» самоусувається зближенням його берегів під дією сил міжатомного притягання (рис. 2.26).
- Це явище називають ***захлопуванням диска вакансій***.
- Край вакансійного диска, що захлопнувся, являє собою ***петлю призматичної дислокації***.

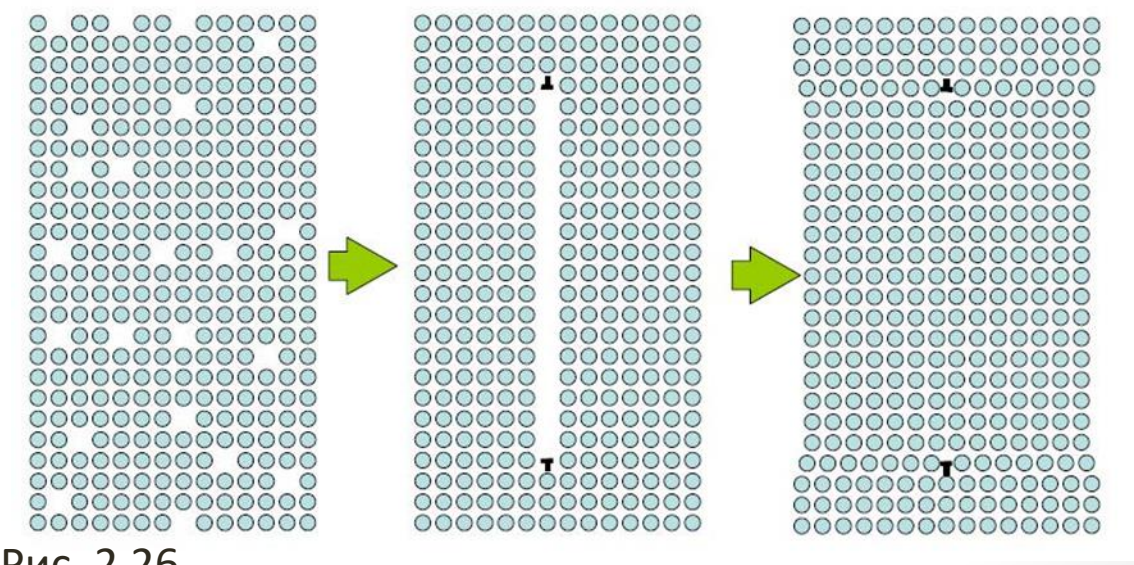


Рис. 2.26.

Переповзання дислокаційної петлі

- У своїй площині призматична дислокаційна петля здатна пересуватися тільки ***переповзанням***. Наприклад, на рис. 2.24 петля буде звужуватися при «розчиненні» крайок диска *АВ*, тобто при відході міжвузловинних атомів, із яких складається диск, у навколишній об’єм кристала.

- На рис. 2.17,*б* призматична петля звужується, навпаки, при підході атомів, що добудовують зсередини кільцеву площину *АВ-С.* Цьому процесу сприяють вакансійні стоки поруч із призматичною дислокацією. Переповзання може звести призматичну петлю в точку, тобто усунути її. При нерівноважному надлишку вакансій у гратці на рис. 2.17,*б* призматична петля буде збільшуватися в діаметрі через підхід до неї вакансій.

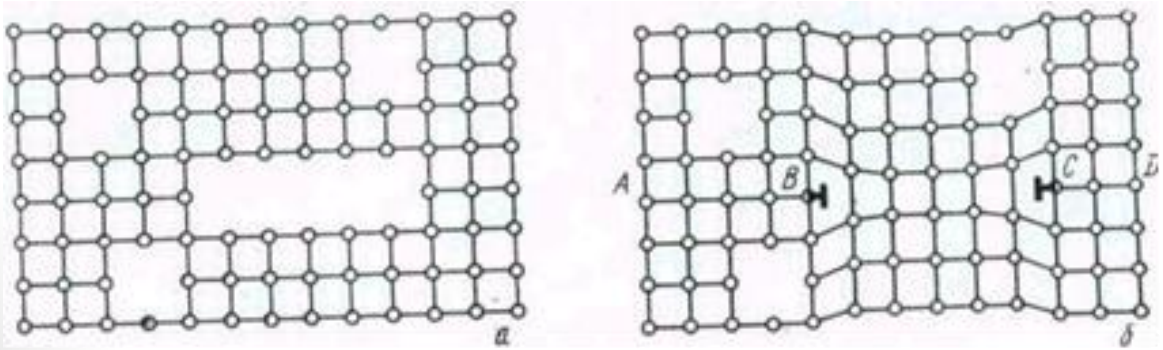


Рис. 2.27. Кристал із розташованим у горизонтальній площині вакансійним диском (а) і після захлопування цього диска, що привело до утворення призматичної дислокаційної петлі ВС (б)

Вектор Бюргерса

Вектор Бюргерса є мірою викривлення кристалічної гратки, обумовленої присутністю в ній дислокації

Він визначає енергію дислокації, діючі на дислокацію сили, величину зв'язаного з дислокацією зсуву, впливає на рухливість дислокації

вектор Бюргерса — головна кількісна характеристика дислокації.

Вектор Бюргерса

Якщо дислокація вводиться в кристал чистим зсувом — так, як це було показано вище на прикладі крайової, гвинтової і змішаної дислокації, то **вектор зсуву** і є **вектором Бюргерса**

Вектор зсуву визначає величину і напрямок зміщень атомів у тій області, де зсув уже відбувся, тобто визначає **ступінь викривлення гратки, зв'язаний із присутністю дислокації**, введеної в кристал шляхом зсуву

Однак дислокація далеко не завжди утворюється за допомогою зсуву. Крім того, **не всі типи дислокацій можна визначити через вектор зсуву**

Більш загальним є визначення **вектора Бюргерса** не як вектора зсуву, а як **міри викривлення кристалічної гратки**

Контур Бюргерса

Щоб оцінити ступінь викривлення гратки, викликаний дислокацією, варто **порівняти недосконалий кристал**, що містить дислокацію, із **досконалим кристалом**

Для цього будують так званий **контур Бюргерса**

Контуром Бюргерса називається замкнутий контур довільної форми, побудований у реальному кристалі шляхом послідовного обходу дефекту від атома до атому в досконалій області кристала

Побудова контура Бюргерса навколо крайової дислокації

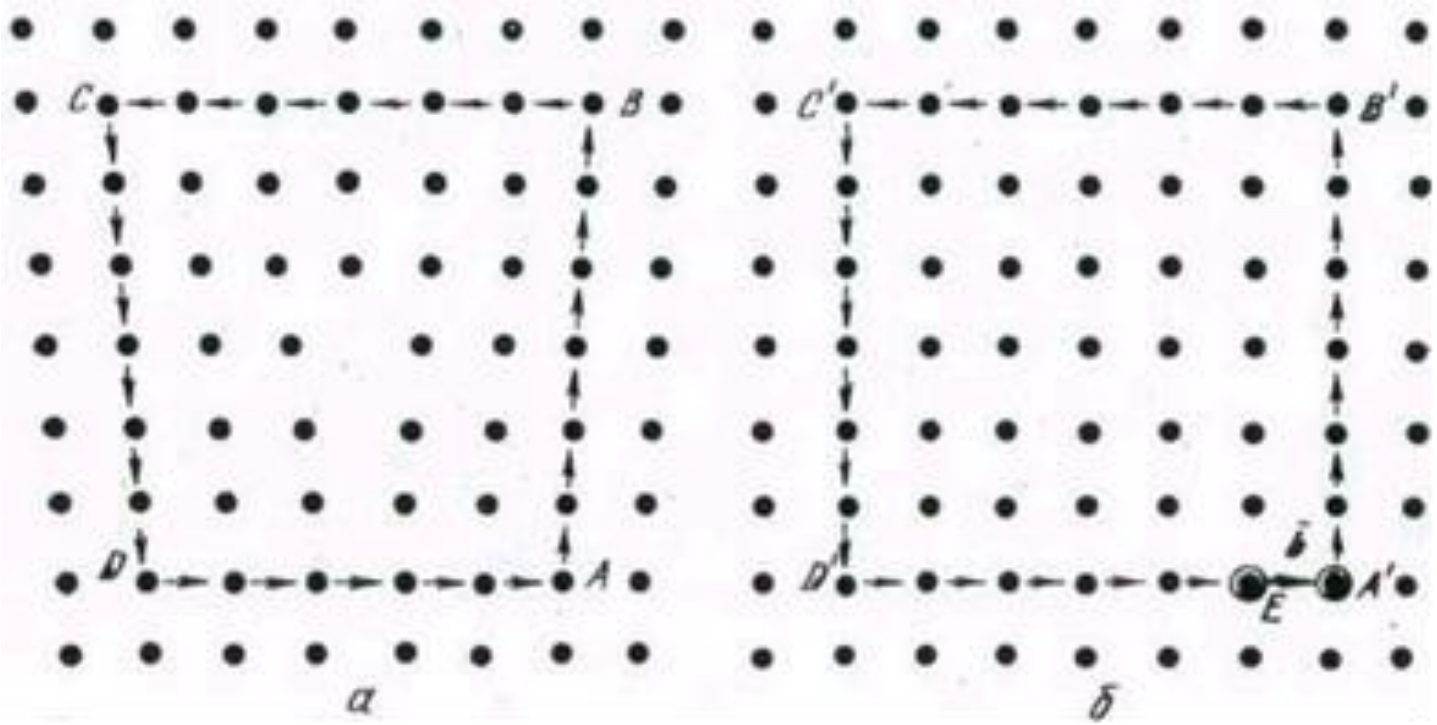
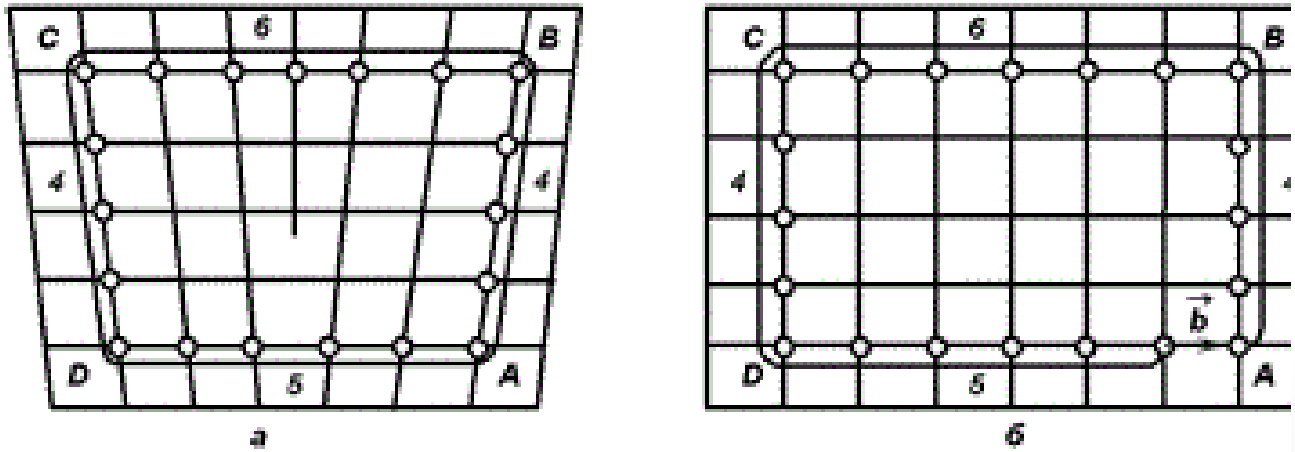


Рис. 2.28. Контур Бюргерса ABCD навколо крайової дислокації (*а*) і еквівалентний контур A/ B/C/D/у досконалому кристалі (*б*);
$\bar{b}$ -вектор Бюргерса

Контур Бюргерса

- **Вектор Бюргерса**, що замикає в досконалому кристалі контур Бюргерса, є **мірою** того **викривлення гратки у недосконалому кристалі, що викликане дислокацією**

- **Величина вектора Бюргерса не залежить від того, наскільки контур Бюргерса віддалений від дислокації**. Чим далі від дислокації ми розташуємо цей контур, тим менше пружні зміщення атомів у досконалій області, але тим довше контур, і сума всіх пружних зміщень, що накопичилася при його обході, не змінюється



Побудова контура Бюргерса навколо гвинтової дислокації

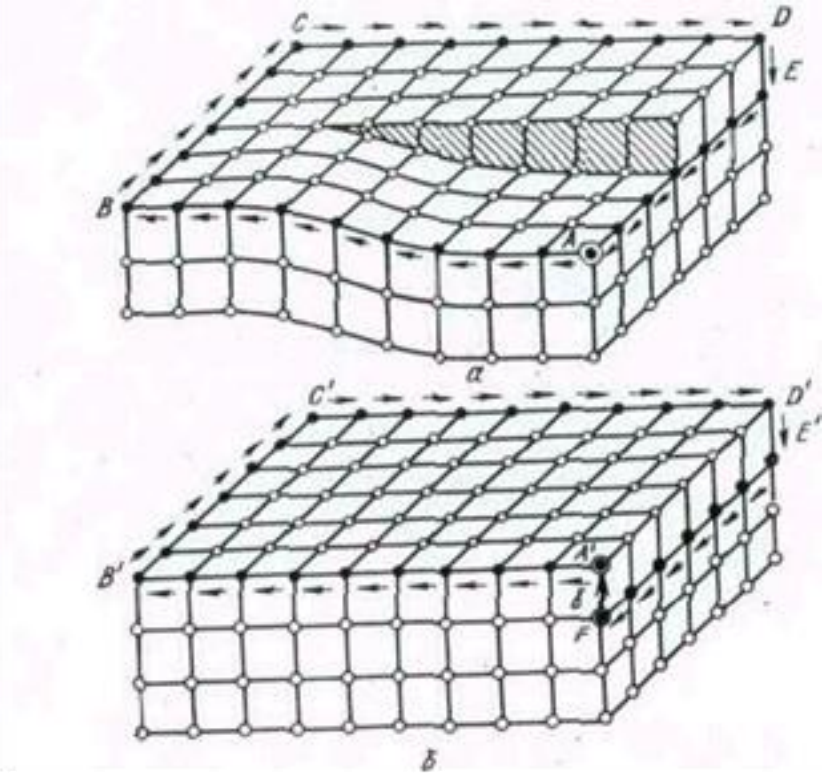


Рис. 2.29. Контур Бюргерса навколо гвинтової дислокації (*а*) і еквівалентний контур у досконалому кристалі (*б*)

Особливості вектора Бюргерса

Величина вектору Бюргерса є дискретною, тобто дорівнює міжатомній відстані або є кратною до неї

Напрямок вектора Бюргерса перпендикулярний до лінії крайової дислокації і паралельний до лінії гвинтової дислокації. Уздовж лінії змішаної дислокації кут між нею і вектором Бюргерса в різних точках має різну величину

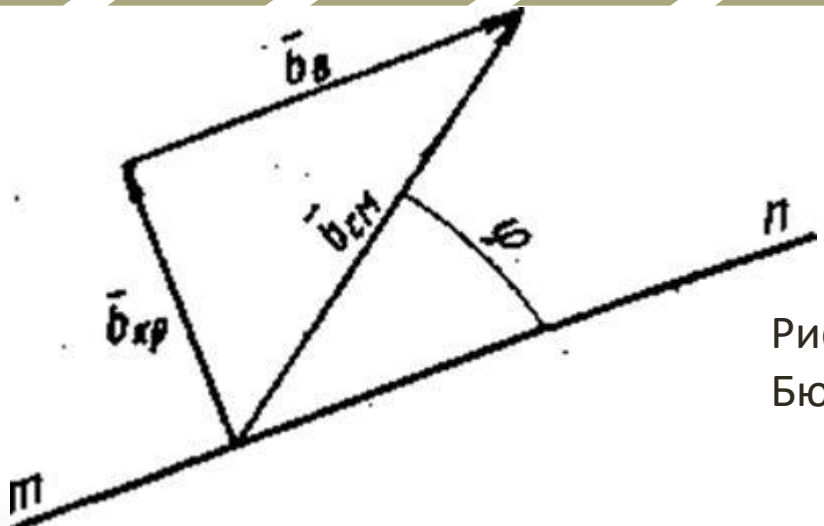


Рис. 2.30 Напрямок вектора Бюргеса, mn – лінія дислокації

Особливості вектора Бюргерса

у дефектів недислокаційного типу дорівнює нулю. Якщо побудувати контур Бюргерса навколо будь-якого точкового дефекту або лінійного дефекту недислокаційного типу (навколо ланцюжка атомів або вакансій), то відповідний контур в ідеальному кристалі опиниться замкнутим

однаковий уздовж усієї лінії дислокації, тобто є інваріантом дислокації