

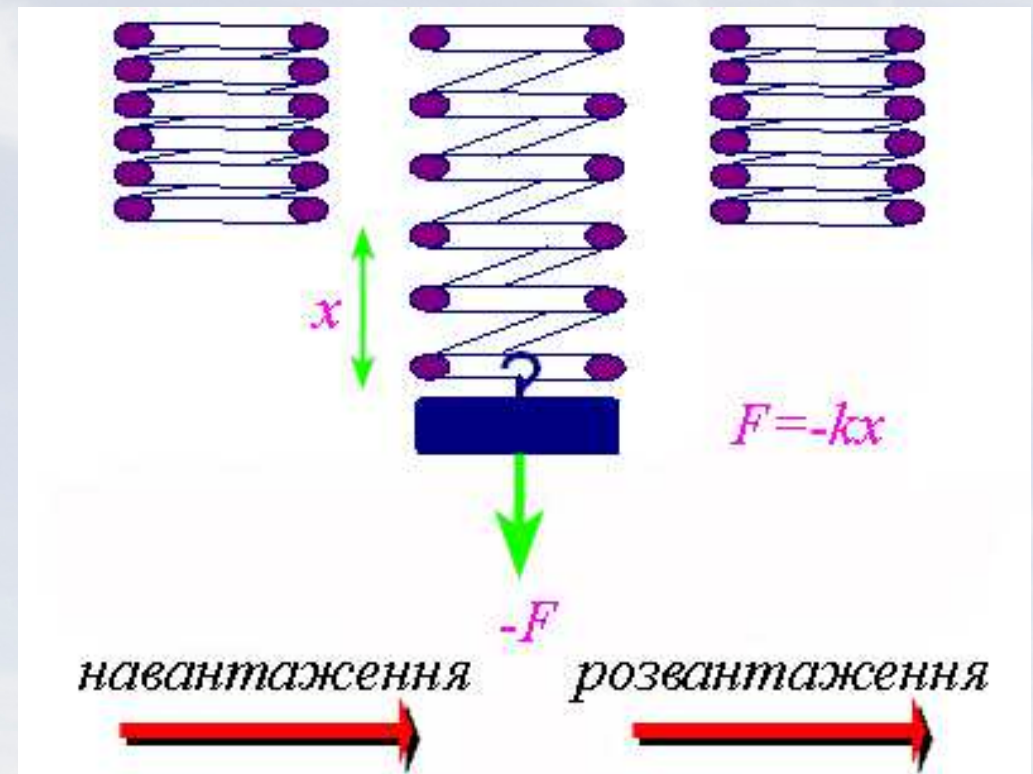
The background of the slide is a photograph of a clear blue sky filled with soft, white, wispy clouds. The clouds are scattered across the frame, with some appearing as thin streaks and others as small, fluffy patches. The overall tone is bright and airy.

Матеріали з пам'яттю форми та їх застосування

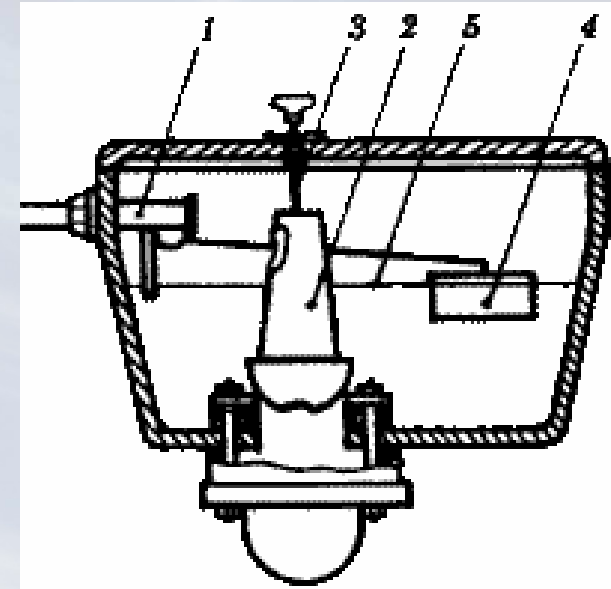
Що це за один?

- Матеріали із пам'яттю форми відносяться до класу так званих інтелегентних матеріалів, що демонструють ефект пам'яті форми
- Інтелегентні матеріали спроможні “інтелегентно” (програмованим чином) реагувати на зовнішні подразники
 - тепло,
 - холод,
 - механічне навантаження,
 - магнітне поле тощо

Приклад. Звичайна пружина деформується під навантаженням “звичайно” згідно із законом Гука. Її *не навчиш* поводити себе по іншому, на відміну від інтелегентного матеріалу.



Приклад традиційного рішення задачі керування



Підхід 2 в 1

- Матеріали із пам'яттю форми можуть забезпечити виконання *декількох функцій* і тим самим одночасно виконують як функцію датчика так і актуатора
- Матеріали із пам'яттю форми піддаються *“тренуванню”* –отже їх можна **навчити** реагувати на зовнішні подразники заданим чином
- Використання матеріалів із пам'яттю форми дозволяє зменшити кількість каналів обміну інформацією – отже підвищити *надійність*



Де це необхідно?

● Там де пасують традиційні матеріали

- Необхідність в хитромудрій поведінці матеріалу
- Недружнє або агресивне середовище
- Підвищені вимоги до функціональних властивостей (вага, міцність, механічна стійкість та витривалість)

● Там де пасують традиційні конструктивні рішення

- Надійність
- Адаптивність
- Унікальні розробки
- Простота в складанні та монтажу

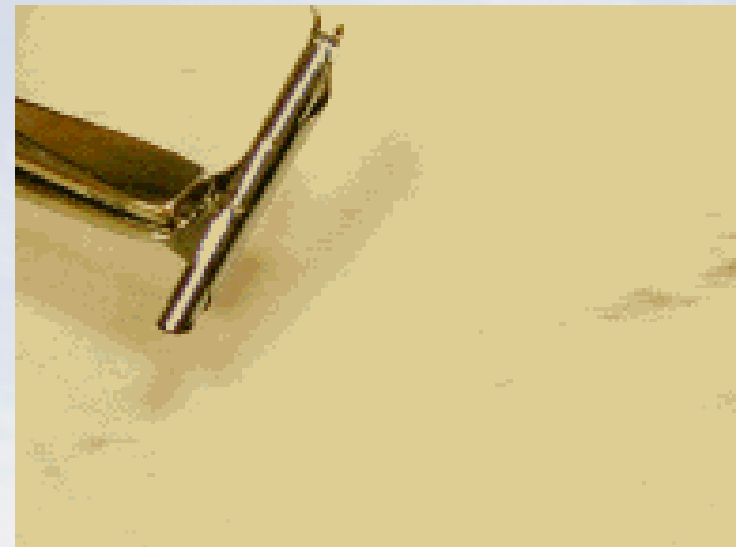
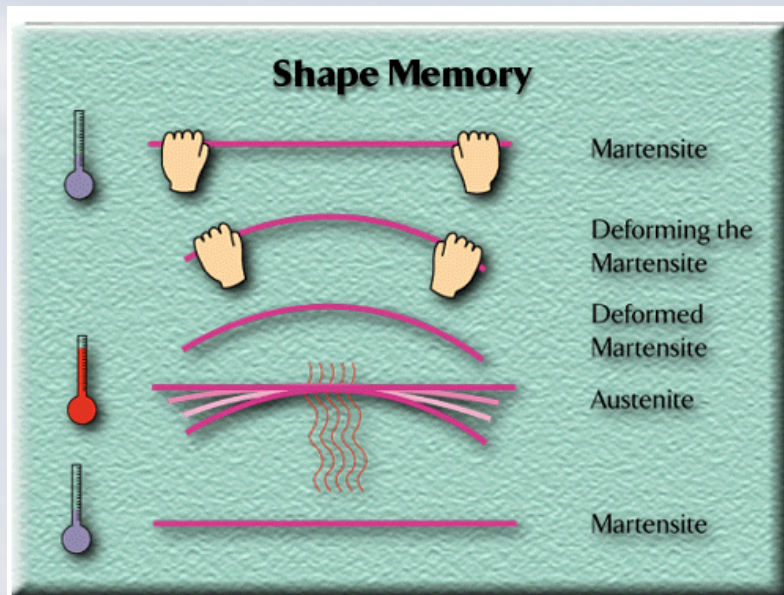


В чому проявляється ефект пам'яті форми?

- *Матеріали із пам'яттю форми* – це група сплавів, які продеформовані у той чи інший спосіб, спроможні відновлювати свою вихідну форму при зміні зовнішніх умов
- Якщо матеріал, продеформований пластично, при нагріванні відновлює початкову форму говорять про *звичайний ефект пам'яті форми*
- Якщо матеріал, під дією навантаження деформується непружно до 10-20%, а при розвантаженні відновлює початкову форму говорять про *ефект псевдопружності*
- Якщо матеріал, під дією магнітного поля деформується непружно, а при зменшенні магнітного поля до нуля відновлює початкову форму, говорять про *магнітокерований ефект пам'яті форми*

В чому проявляється ефект пам'яті форми?

- В охолодженому стані матеріал легко деформується, оскільки має високу пластичність - легко набуває будь-якої необхідної форми. При нагріванні він відновлює свою початкову форму



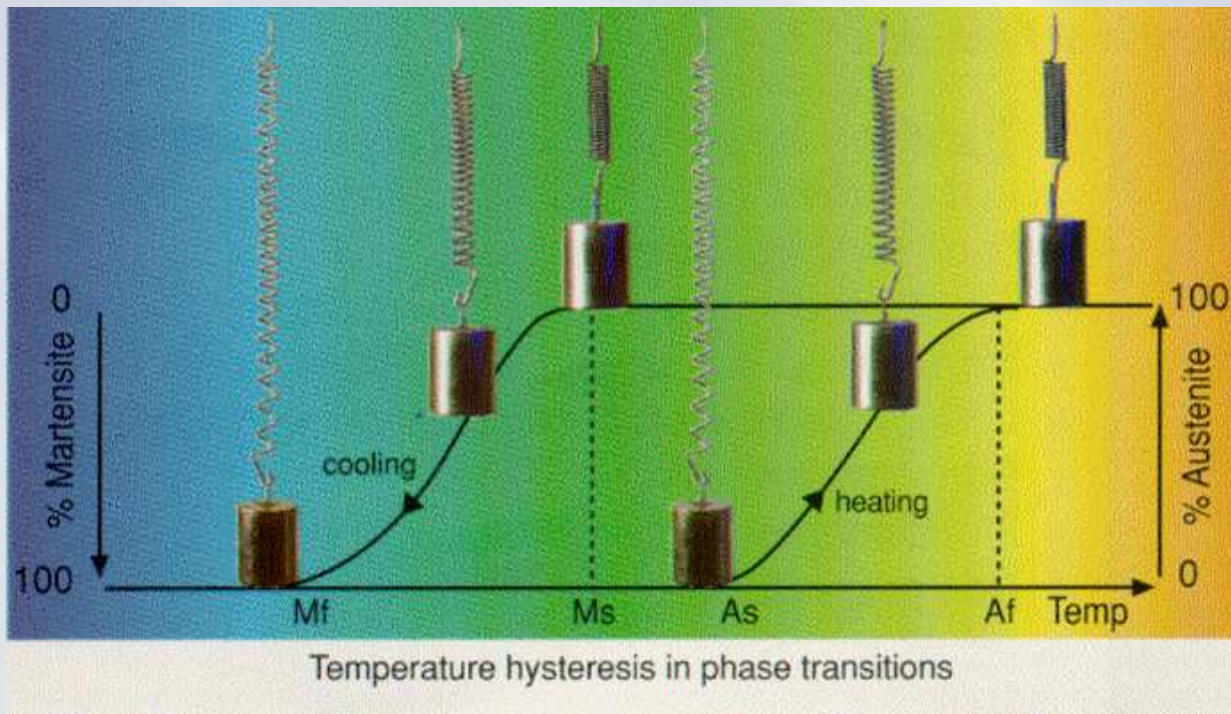
В чому проявляється ефект псевдопружності?

- При сталій температурі матеріал суттєво деформується (10-20%) під дією докладеної сили. Після зняття сили він відновлює свою форму, так наче б то деформація була пружня. Звичайний матеріал за таких деформацій не спроможний відновити свою форму, так як це має місце із, наприклад, міддю.



3 чим пов'язана така незвичайна поведінка?

- Ефект пам'яті форми зумовлений *мартенситним перетворенням*, що спостерігається в деяких металах і сплавах на основі Fe, Cu, Ti, Ni, Zr
- Мартенситне перетворення – це *структурне бездифузійне фазове перетворення першого роду*, при якому зміна кристалічної структури відбувається за рахунок зсуву одних шарів атомів відносно других на відстані, що не перебільшує міжатомні
- Характерною ознакою такого типу фазового перетворення є *гістерезис* властивостей, що в кінцевому випадку є необхідною передумовою наявності пам'яті



Високо температурну фазу називають - *аустеніт*

Низькотемпературну фазу – *мартенсит*

Аустеніт та мартенсит мають *різні кристалічні структури*, проте мають *однаковий хімічний склад*

Різниця між температурою початку переходу аустеніту в мартенсит M_s та температурою A_f завершення зворотнього переходу визначає температурний гістерезис

Трохи історії, яка почалася 4 тисячі років тому...

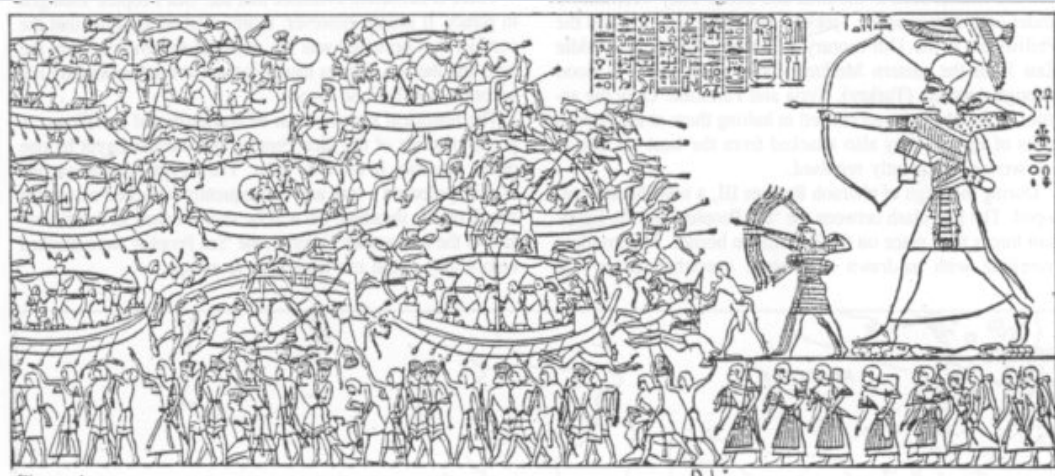
- Кінець XIII в. до н.е. Цивілізація *бронзового віку* сягнула апогею матеріального та культурного достатку
- В глобалізованій економіці мирно співіснують чотири цивілізаційні центри
 - Египет
 - Хетська держава
 - Крито-мекенські міста-держави
 - Фінікійські та левантійські міста на ханаанському узбережжі
- Остання битва між Хеттами та Египтом в 1274 р. до н.е.



Основою економіки та матеріального виробництва була бронза – сплав міді та олова. Першу можна було здобувати в багатьох місцях, олово було стратегічним товаром і здобувалося на Британських островах та в Богемії

Початок Катастрофи і “темних віків”

- Починаючи із кінця XII ст. до н.е. Цивілізації бронзового віку були знищені в безперервних війнах та набігах таємничих “народів моря”
- Падіння Трої в 1225 році
- Після 1180 року починаються “темні віки” – епоха бронзи скінчилася. Почався *“залізний вік”*



Хетти були монополістами із виробництва заліза, що коштувало в 40 більше ніж срібло. Проте вони ж знайшли спосіб, як його дешево здобувати та обробляти і 200 років тримали це в секреті.

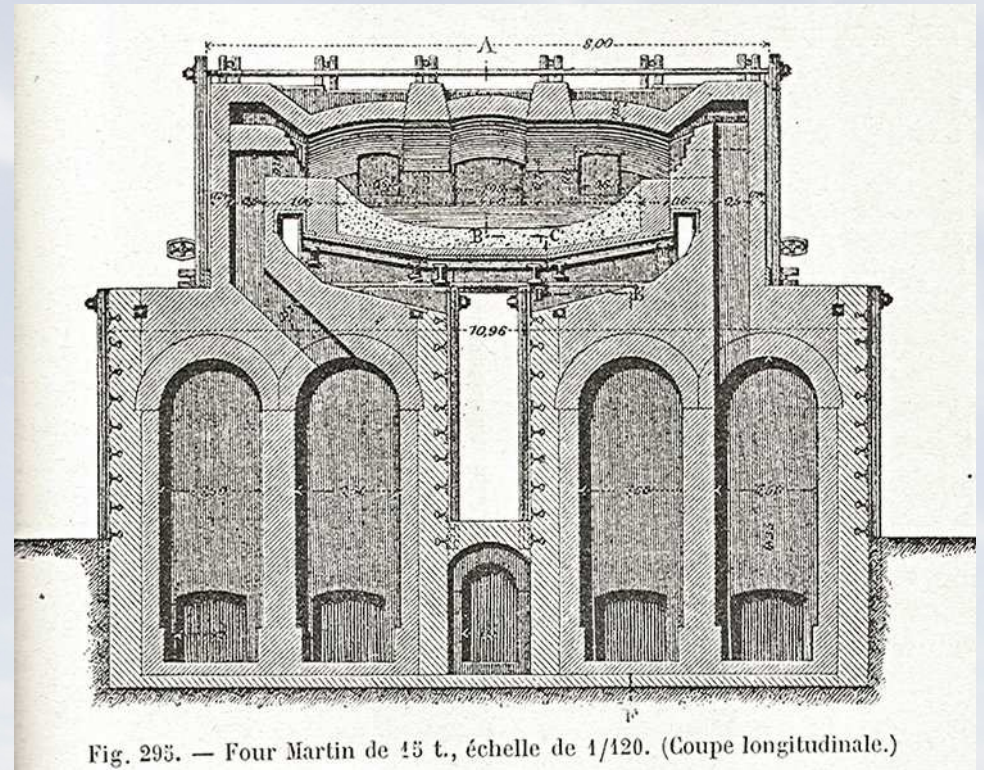
Як не дивно, саме цей секрет і став початком кінця як Хеттів, так і цивілізації бронзового віку

Залізо проти бронзи

- Бронзова зброя була більш досконала. Залізні мечі - гнулись та тупилися
- Бронзовий меч можна було загострити, залізний тільки перекувати
- Із бронзи можна було виливати вироби складної форми, із заліза ні, аж до середини XV ст.н.е.
- Залізо потребувало складної термообробки і легування вуглецем, щоб отримати необхідні механічні властивості. Фактично процес його обробки вважався чимось на кшталт магії. Недаремно вірили, що ковалі знаються із самим чортом
- **Але залізної руди було в біса як багато!!!**

В чому ж технологічна перевага?

- Залізо із невеличкими добавками вуглецю (*сталь*) після *загартування* в воду ставало міцним, пружним проте ламким. Після *відпалу*, тобто витримці при температурі 600-700°C, воно ставало м'яким.
- Вдалий вибір вмісту вуглеця разом із комбінацією відпалу та загартування дозволяло отримувати бажані механічні властивості
- Використання міхів починаючи із XVI ст.н.е. дозволило розробити ливарне виробництво
- З початку XIX ст.н.е. в Великобританії для виробництва сталі почали використовувати кам'яне вугілля
- В 1864 П'єр Мартен, французський металург, запропонував регенеративний спосіб виплавки сталі – залізний вік досяг свого апогею



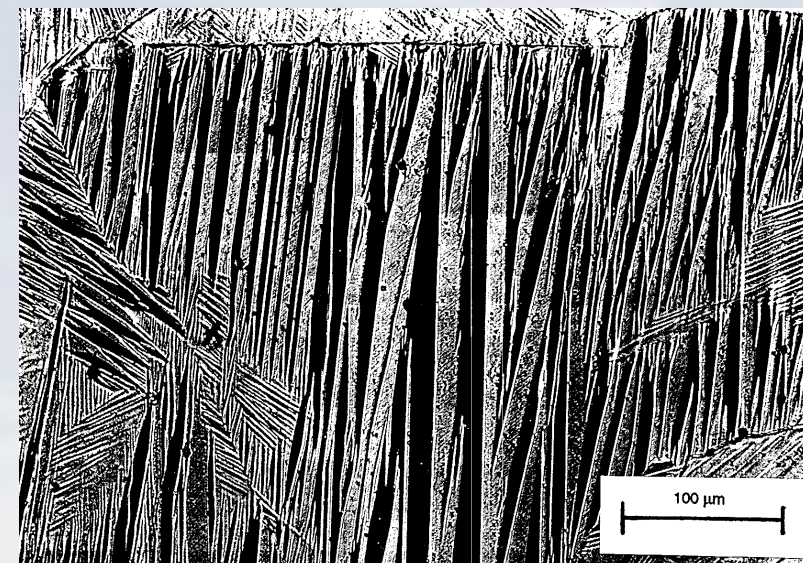
Механізм зміцнення сталі

- Лише наприкінці XIX ст.н.е. Адольф Мартенс, німецький металург, встановив, що природа зміцнення сталі шляхом загартування полягає в утворенні в металі нової фази, яка згодом була названа на його ім'я - *мартенситом*
- До 30 років XX ст. вважалось, що мартенсит є унікальним явищем, характерним лише для сталі і є пересиченим розчином вуглецю в залізі, концентрація якого така ж, як і в аустеніті
- Суттєво, що твердість мартенситу в тричі більше ніж аустеніту
- При швидкому охолодженні в воду від температур 800-1000°C в сталі утворюється мартенсит. Якщо надалі сталь нагріти до 600°C мартенсит зникає і з'являється "м'який" аустеніт

Fe-C



Fe-Pt

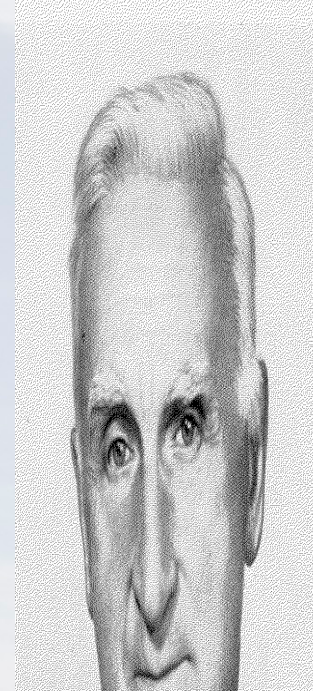
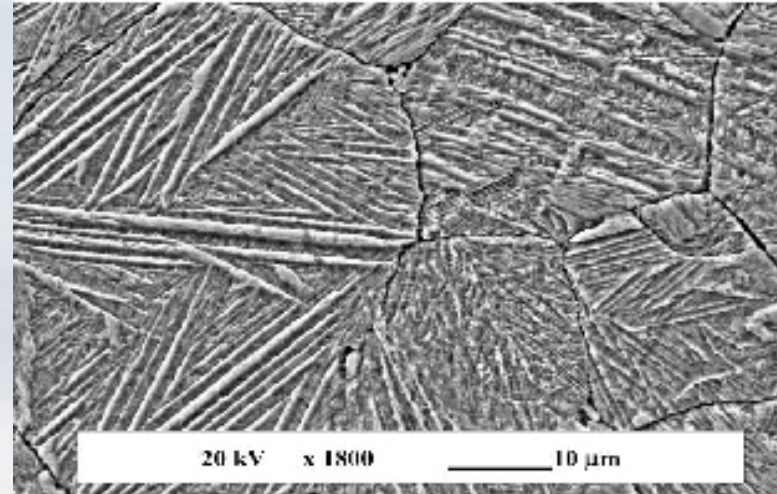


Від заліза до кольорових металів

- Е.Вайн (1926), Е.Шайл (1929) висунуто гіпотезу про механізм мартенситного перетворення в сталях
- 30-ті роки XX ст. знайдено кристалографічні перетворення в сплавах *Cu-Al*, *Cu-Sn*, *Cu-Zn* – надзвичайно подібні до мартенситного перетворення в сталях
- Губоподібна поведінка еквіатомного сплаву *Au-Cd* (А.Оландер 1938)
- Г.В Курдюмов сформулював основні ознаки і дав визначення мартенситному перетворення (1948)
- Л.Г.Хандрос разом із Г.В.Курдюмовим відкрили *термопружне мартенситне перетворення в Cu-Al* (1948)
- В 1961 J. Buehler відкрив ефект пам'яті форми в *Ni-Ti*.

(In 1961, *Nitinol*, which stands for Nickel Titanium Naval Ordnance Laboratory, was discovered to possess the unique property of having shape memory. William J. Buehler, a researcher at the Naval Ordnance Laboratory in White Oak, Maryland, was the one to discover this shape memory alloy. The actual discovery of the shape memory property of Nitinol came about by accident. At a laboratory management meeting, a strip of Nitinol was presented that was bent out of shape many times. One of the people present, Dr. David S. Muzzey, heated it with his pipe lighter, and surprisingly, the strip stretched back to its original form.)

Cu-Al-Ni V.Recarte at al



Мартенситное превращение состоит в закономерной перестройке решетки, при которой атомы не обмениваются местами, а лишь смещаются друг относительно друга на расстояния не превышающие межатомные (Г.В. Курдюмов, Изв. АН СССР, хим. сер. №2, 271, 1936)

Сновні риси мартенситного перетворення

- Мартенситні перетворення (МП) є бездифузійні
- МП є зворотнім і відбувається із температурним гістерезисом
- При МП між гратницями високотемпературної та низькотемпературної фази є точне кристалографічне співвідношення
- Границя між кристалами мартенситної та аустенітної чітко визначена, хоча і не збігається із кристалографічними площинами
- МП неможливо затримати швидким охолодженням. Точка початку МП - M_s в більшості випадків не залежить від швидкості охолодження
- Перетворення відбувається за рахунок швидкого росту мартенситних кристалів
- Перетворення може бути стимульовано зовнішніми навантаженнями вище M_s , а в деяких випадках зовнішнім магнітним полем

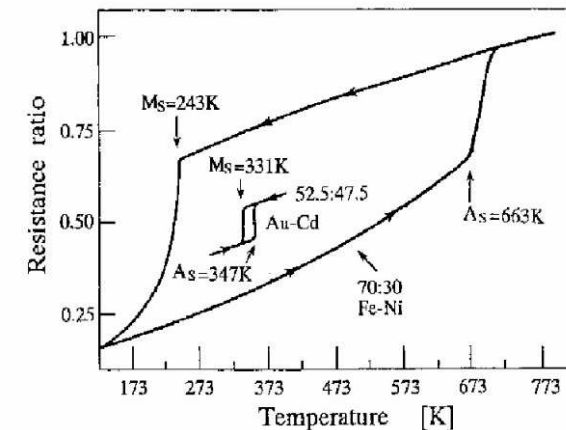
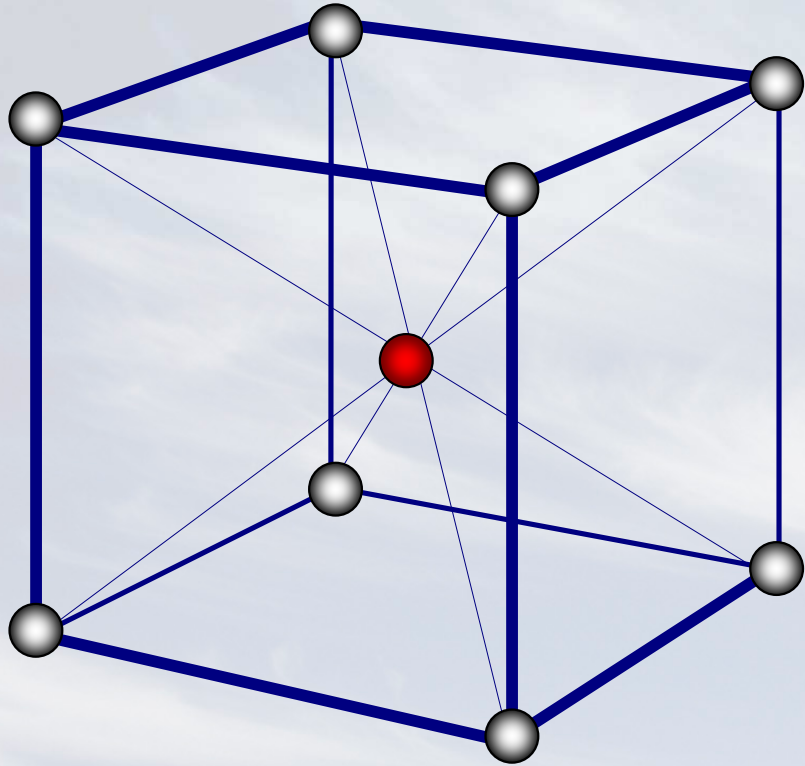
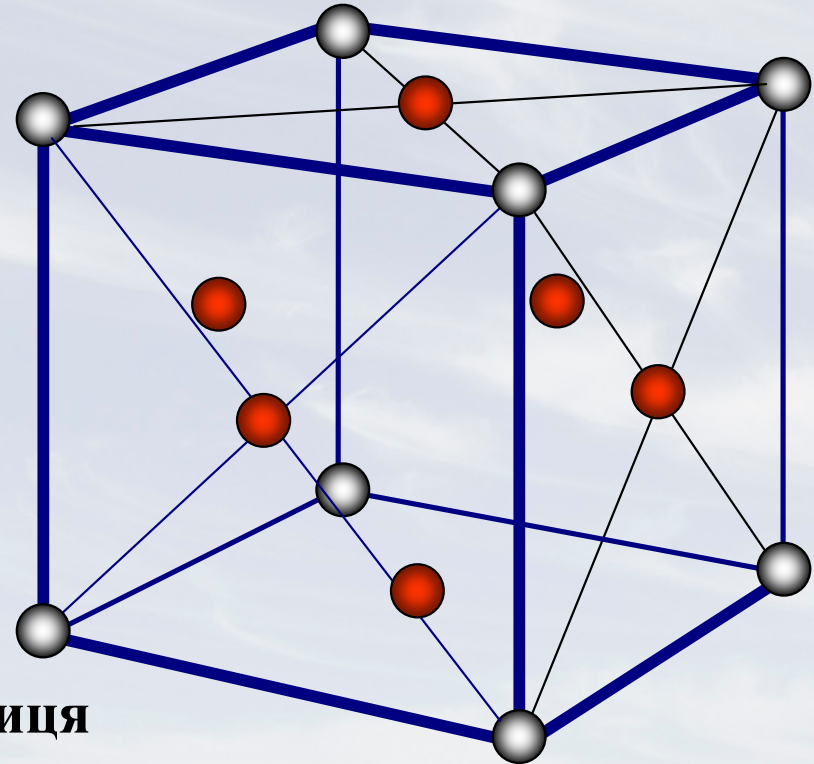


Fig. 1.16. Electrical resistance changes during cooling and heating Fe-Ni and Au-Cd alloys, illustrating the hysteresis of the martensitic transformation on cooling, and the reverse transformation on heating, for non-thermoelastic and thermoelastic transformations respectively. (After Kaufman and Cohen³⁷)

Кристалічна структура мартенситу та аустеніту



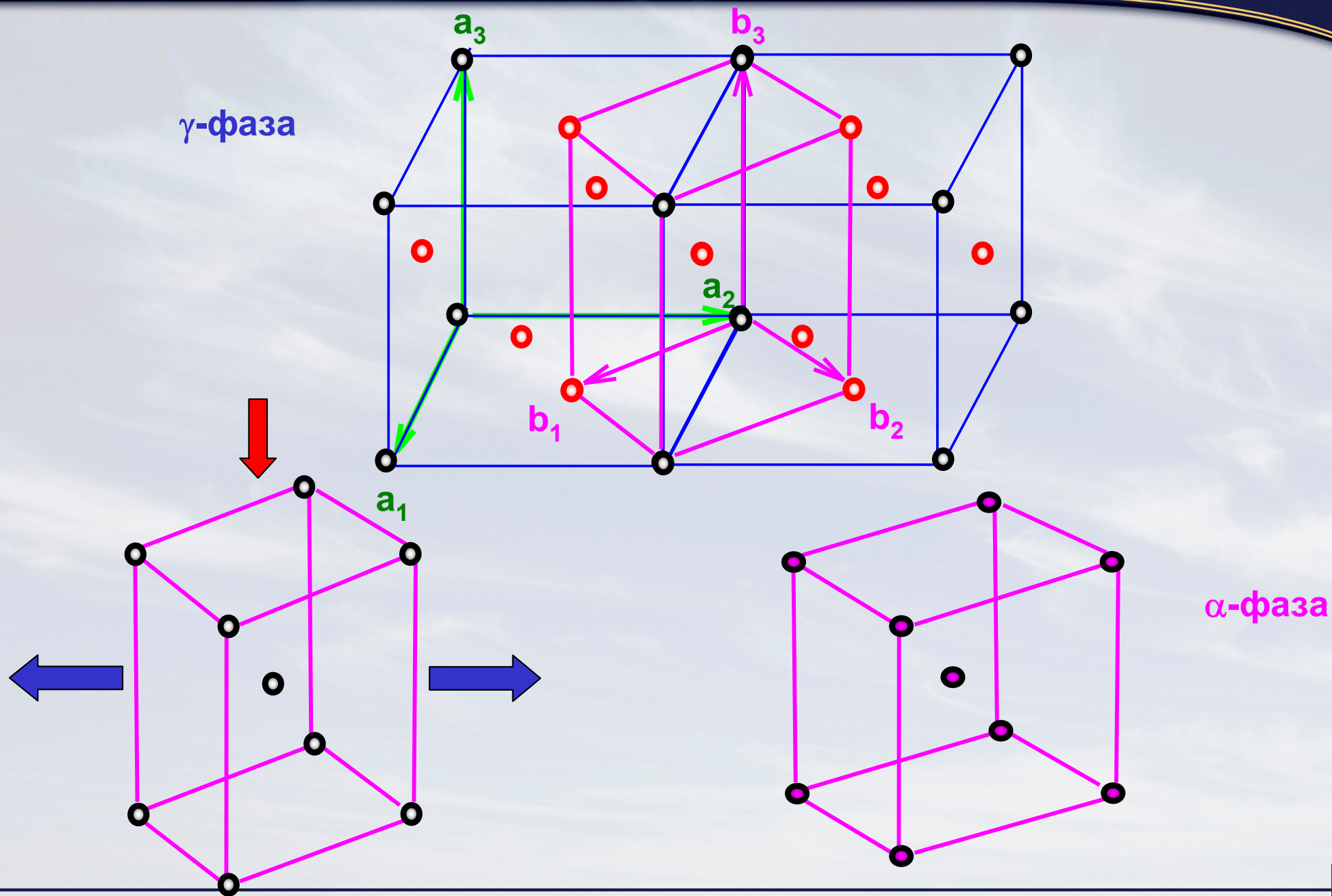
Об'ємноцентрована кубічна ґратниця
(α -фаза, мартенсит)



Гранецентрована кубічна ґратниця
(γ -фаза, аустеніт)



Бейнівська деформація



Рельєф та зсувний характер мартенситного перетворення

● Бейнівська деформація може пояснити

- ✓ кристаллографічні зміни
- ✓ об'ємний ефект $\Delta V/V \approx 1-4\%$

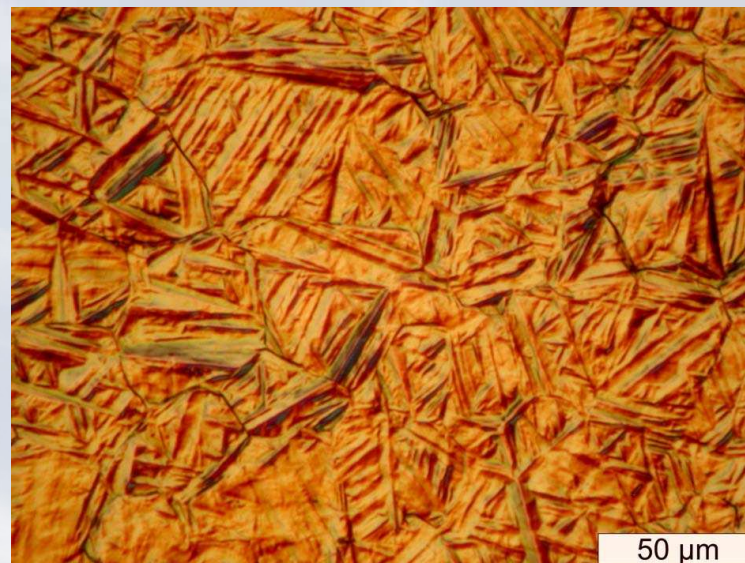
● Та не пояснює

- Орієнтаційні співвідношення, що спостерігаються експериментально

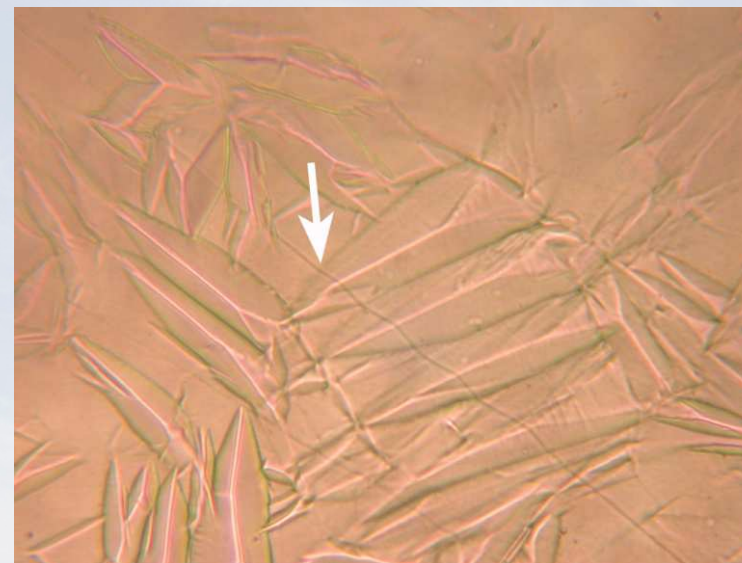
$$\{1\ 1\ 1\}_{\gamma} \parallel \{0\ 1\ 1\}_{\alpha}$$
$$\langle 1\ 0\ 1 \rangle_{\gamma} \sim \pm 5.3 \langle 1\ 1\ 1 \rangle_{\alpha}$$

- Рельєф на поверхні шліфа
- Ламаний характер подряпин на поверхні шліфа
- Зсувну деформацію $s=20-30\%$ асоційовану із мартенситним кристалом

Fe-0.44C-0.34Si-0.70Mn-0.10Cr-0.16Ni-0.18Mo



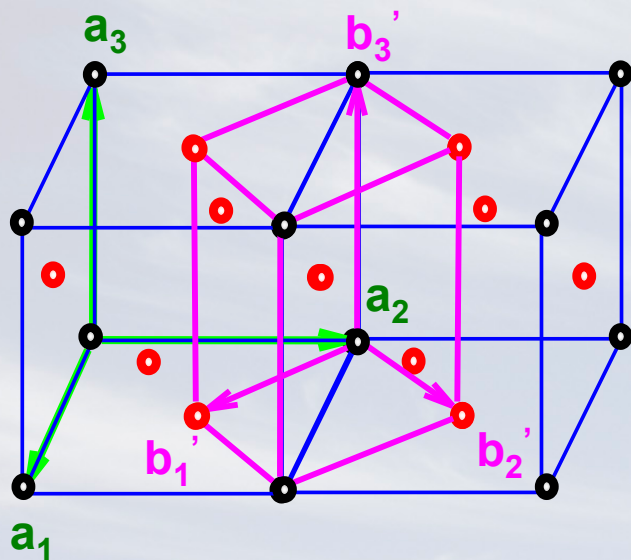
Fe-0.31C-30.5Ni wt%



Ще раз про Бейнівську деформацію

- Вектори $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3$ гратниці аустеніта (γ -фази) можна трансформувати в вектори мартенситу (α -фази) із допомогою перетворення, що задається матрицею \mathbf{B}

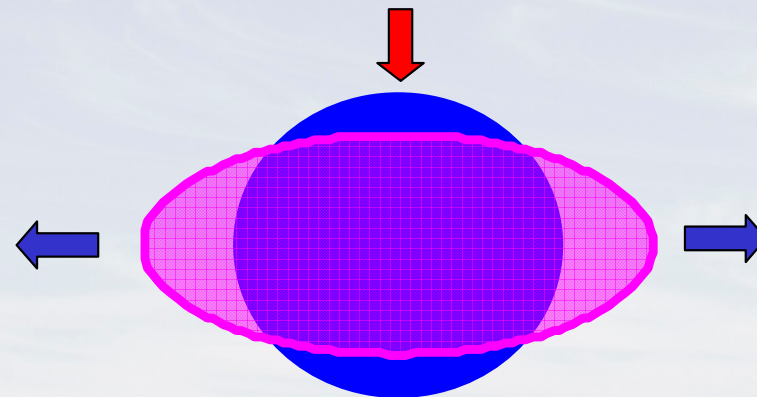
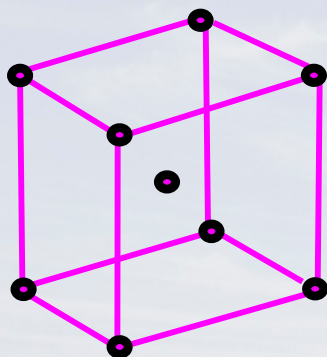
$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_1 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_2 \end{pmatrix}, \quad \text{де } \varepsilon_1 \cong 1.12 \quad \varepsilon_2 \cong 0.8$$



Подіявши на будь-який вектор, виділений в гратниці аустеніту, наприклад \mathbf{b}_1' , ми отримаємо вже вектор гратниці мартенситу (відповідно \mathbf{b}_1)

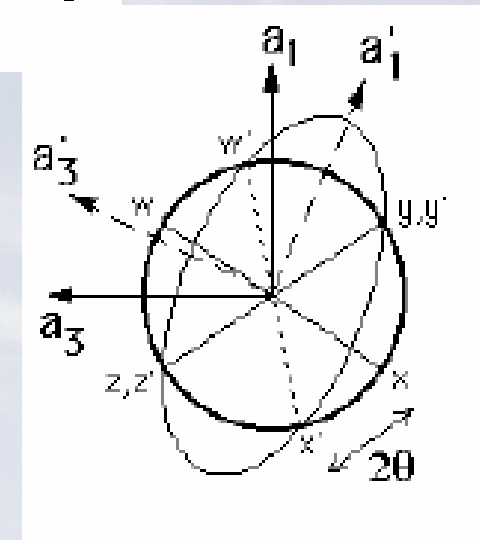
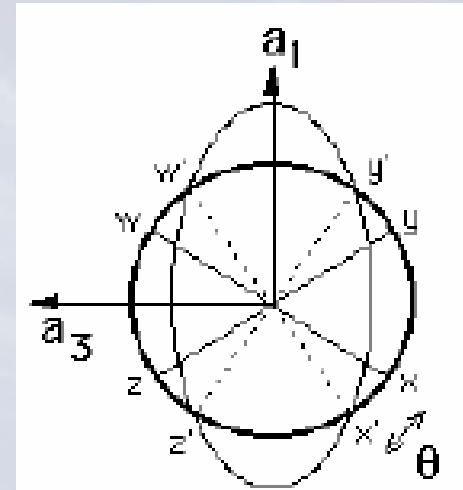
$$\mathbf{B}\mathbf{b}_1' = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_1 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{2}a_1 \\ -\frac{1}{2}a_1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\varepsilon_1}{2}a_1 \\ -\frac{\varepsilon_1}{2}a_1 \\ 0 \end{pmatrix} = \mathbf{b}_1$$

За такого перетворення сфера із аустеніту перетворюється на еліпсоїд обертання



Перетворення з інваріантною лінією

- При бейнівській деформації не залишається жодного вектора, що був би одночасно непродеформований та неповернутий
- Проте існують напрямки, що утворюють два конуси із утворюючими $w'x'$ та $y'z'$, які залишаються непродеформованими і яким в аустениті відповідають лінії wx та yz
- Повернувши еліпсоїд мартенситу на кут θ , можна добитись збігу однієї із ліній (наприклад $y'z'$) із вихідною yz
- Отже два послідовних перетворення бейнівська деформація **B** та перетворення повороту **R** на кут θ забезпечує перетворення принаймні із **інваріантною лінією** тобто недеформованою та неповернутою
- Загальне перетворення **RB** на жаль не забезпечить належної форми мартенситного кристалу



$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix}$$

Схема виходу мартенситного кристалу на поверхню шліфа

- Експериментальні спостереження вказують, що існує площина (*габітус*), на якій спряження між кристалом мартенситу та аустениту практично ідеальне, без суттєвих деформацій

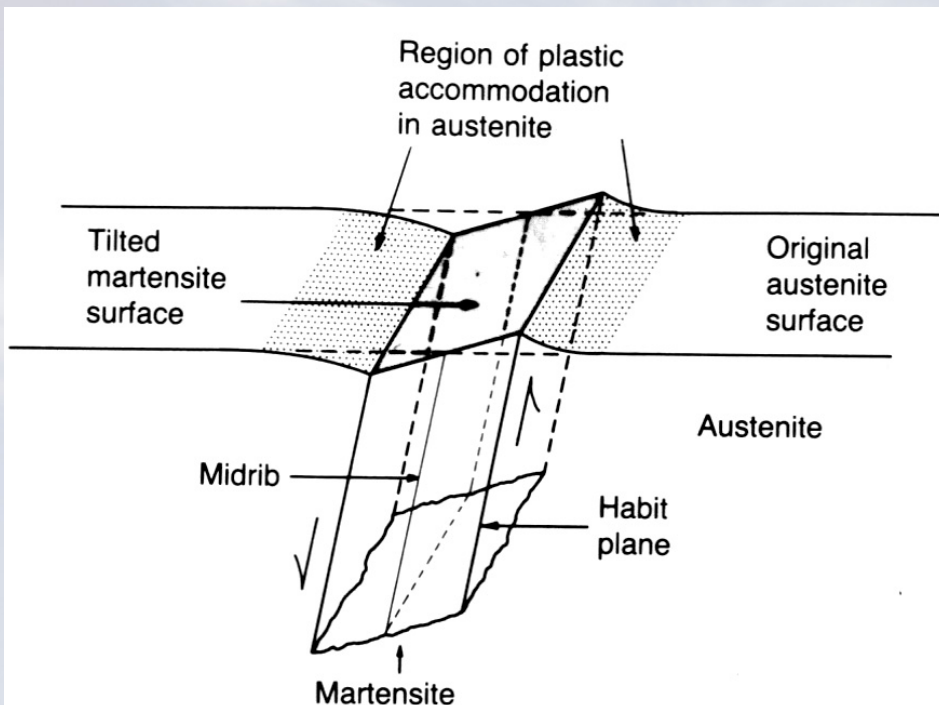
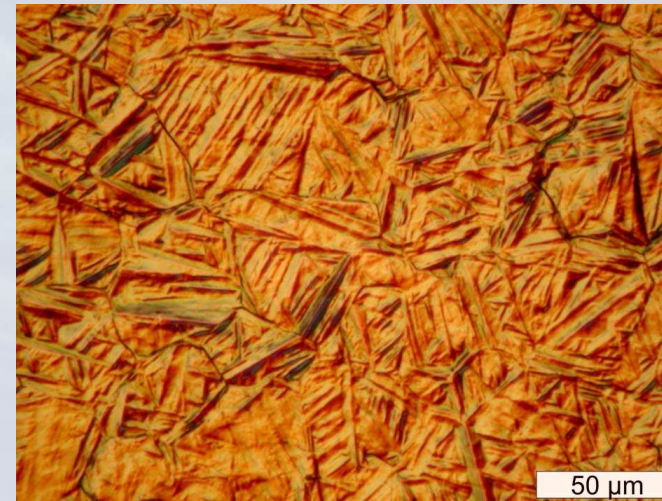


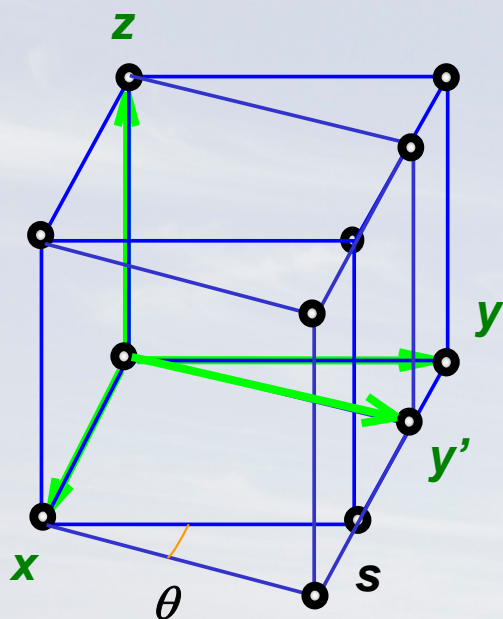
Fig. 3.3. Schematic of shear and surface tilt associated with formation of a martensite plate. (Ref 3.6; adapted courtesy of M.D. Geib, Colorado School of Mines, Golden)



- Схематично центральна частина кристалу (*мідріб*) залишається “на місці” в той час, коли зсув з одного боку мідрібу відбувається в одному напрямку, а з іншого боку в протилежному
- Прилеглі області в астениті можуть бути пластично деформовані, проте *аккомодация* може відбуватися і в дещо інший спосіб

Яким чином можна описати необхідне нам перетворення форми кристалу?

- Належне перетворення, що коректно описує трансформацію форми є зсув, що може бути задано матрицею P_1 зсуву
- Наприклад, наведена матриця описує зсув в площині zx в напрямку x на величину s
- Вектори z та x , а також ті, що лежать в цій площині залишаються незмінними, а вектор y повертається на кут, що визначається як $\tan\theta=s$
- Зсув є перетворення з *інваріантною площиною*



$$P_1 = \begin{pmatrix} 1 & s & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \text{ де } s - \text{величина зсуву}$$

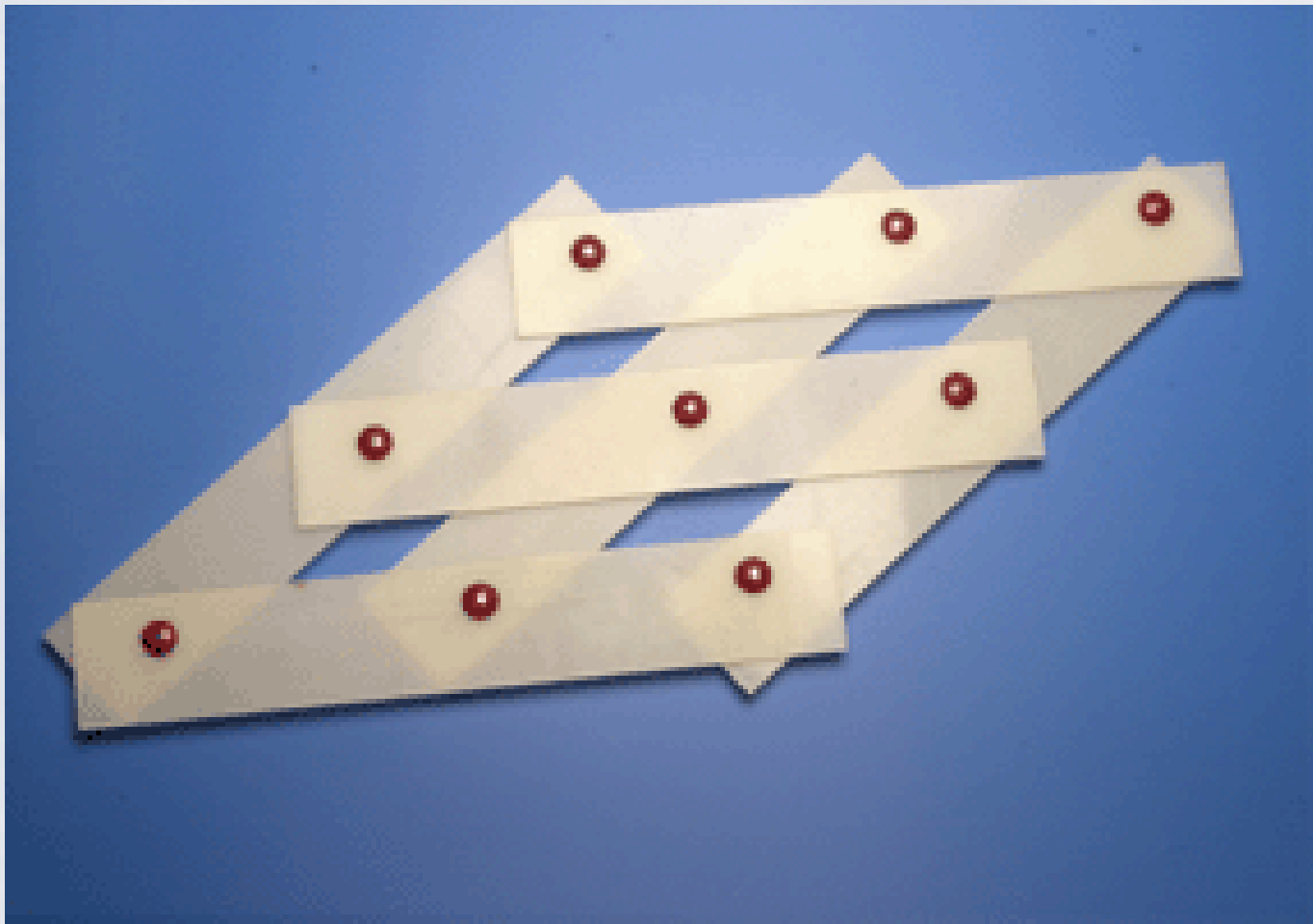
$$P_1 \cdot x = \begin{pmatrix} 1 & s & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = x$$

$$P_1 \cdot y = \begin{pmatrix} 1 & s & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = y'$$

$$P_1 \cdot z = \begin{pmatrix} 1 & s & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = z$$

Як зсув змінює кристалічну ґратницю?

- Гомогенний (однорідний) зсув не може пояснити кристаллографічні зміни
- Не може пояснити також і орієнтаційні співвідношення



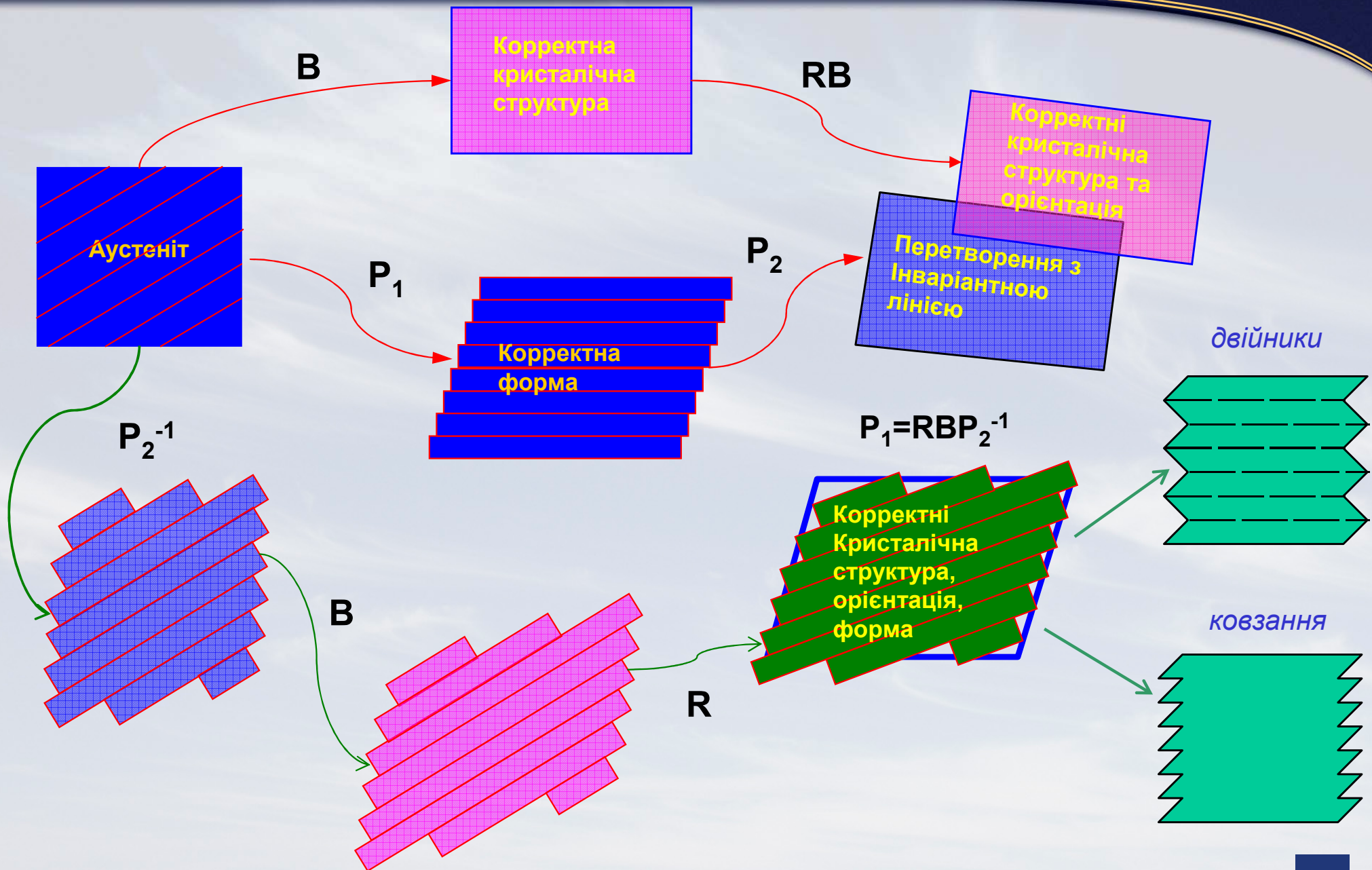
Яким іншим чином можна отримати перетворення із інваріантною лінією?

- З допомогою перетворення P_1 можна отримати необхідну форму кристалу, проте не структуру
- Якщо до перетворення P_1 додати ще одне зсувне перетворення P_2 , результат $P_1 P_2$ буде перетворення з інваріантною лінією
- З іншого боку послідовна дія бейновської деформації та обертання дає правильну структуру і забезпечує наявність інваріантної лінії
- Ми завжди можемо підібрати параметри додаткового зсуву P_2 такими, щоб виконувалось рівняння

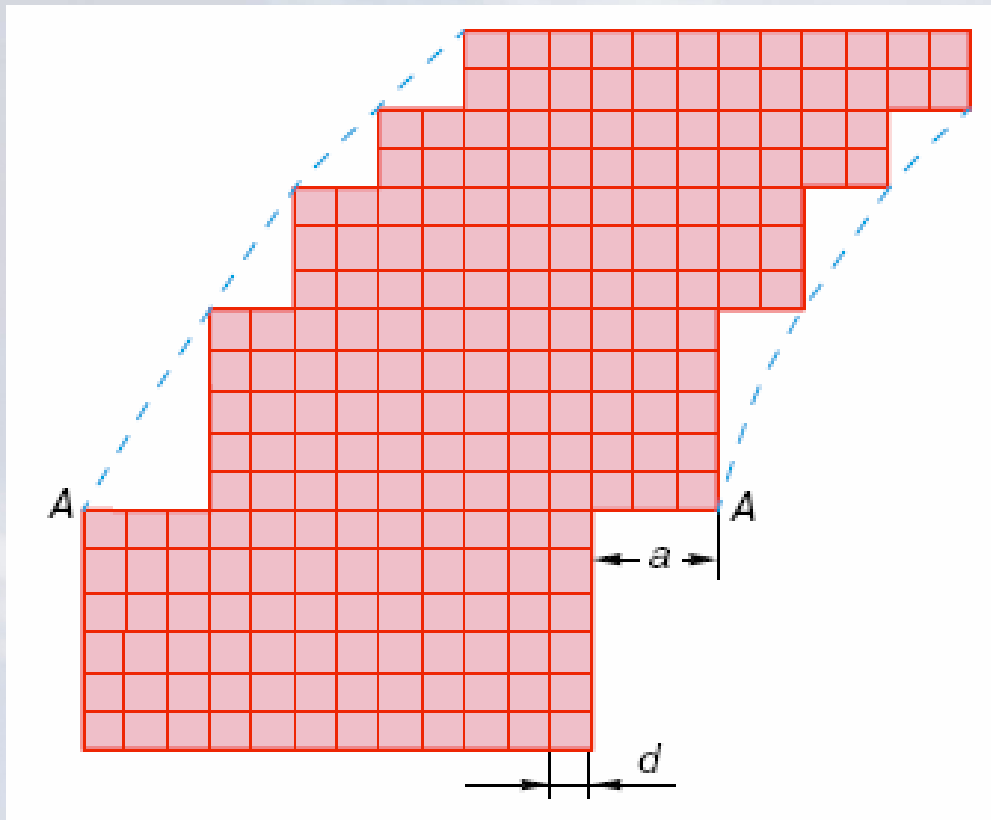
$$P_1 P_2 = RB$$

- Тоді деформація $P_1 = RB P_2^{-1}$ буде деформацією із інваріантною площиною, що правильно описує форму кристалу мартенситу
- Якщо зсув P_2^{-1} негомогенний, тобто діє не на кристалічну ґратницю, а на матеріал в цілому (*деформація із інваріантною ґратницею*), то перетворення $RB P_2^{-1}$ забезпечує як правильну кристалічну структуру, так і правильну кристалічну форму
- Деформація з інваріантною ґратницею може бути забезпечена *ковзанням* та *двійникуванням*

Схема кристаллографічної теорії МП

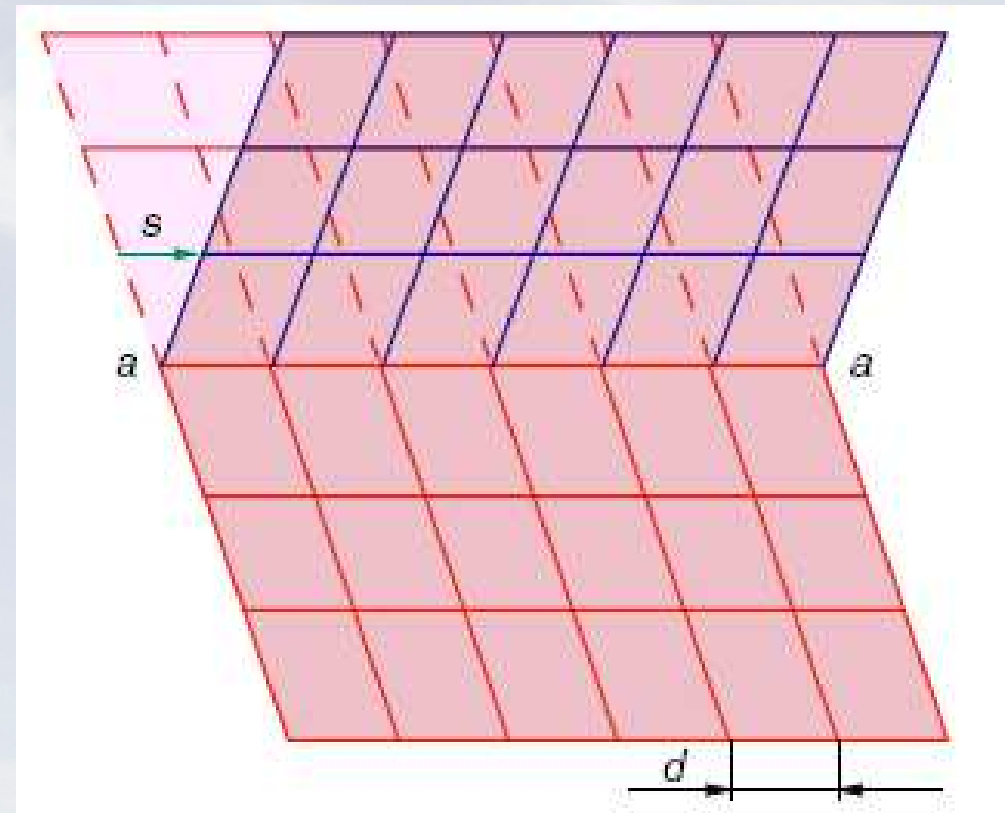


Пластичне ковзання та двійниковування

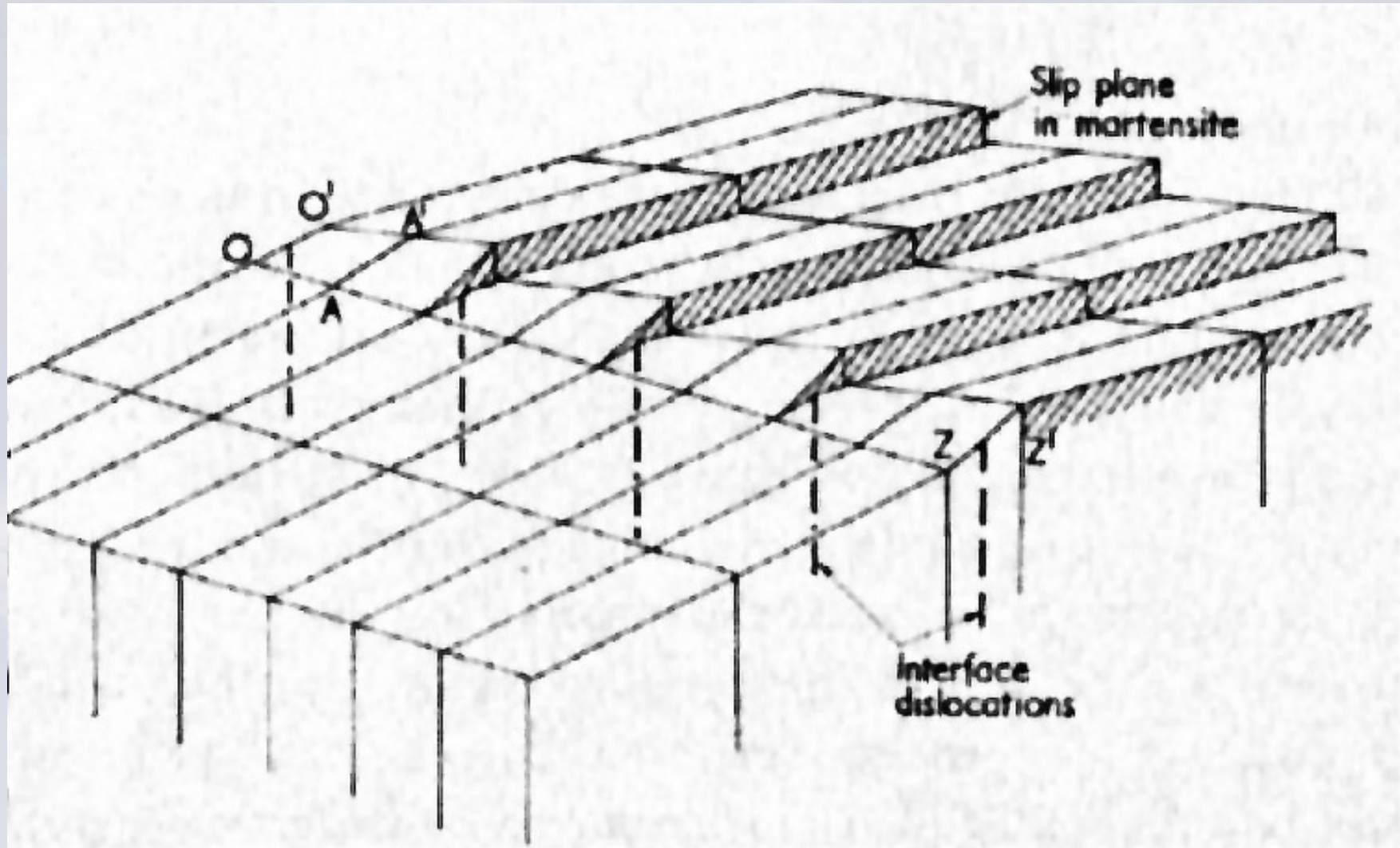


Пластичне ковзання

Механічне двійниковування



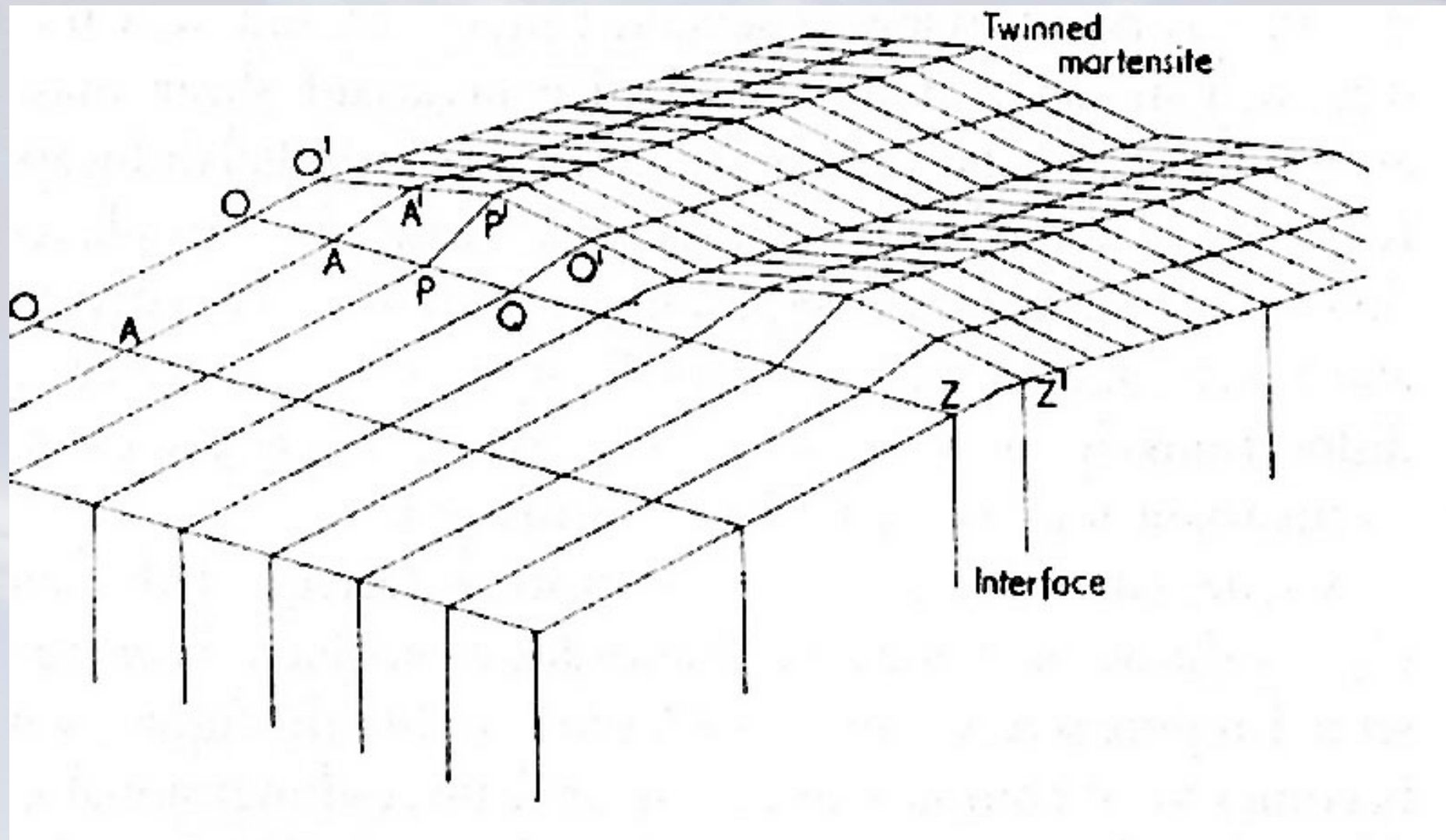
Рельєф на поверхні (пластично закомодований мартенсит)



Christian, 1965, "ICOMAT 0"



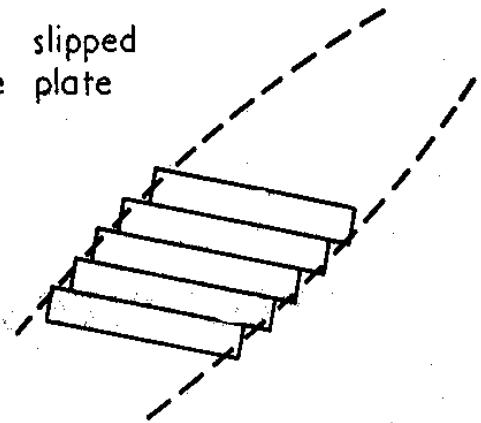
Рельєф на поверхні (здвійникований мартенсит)



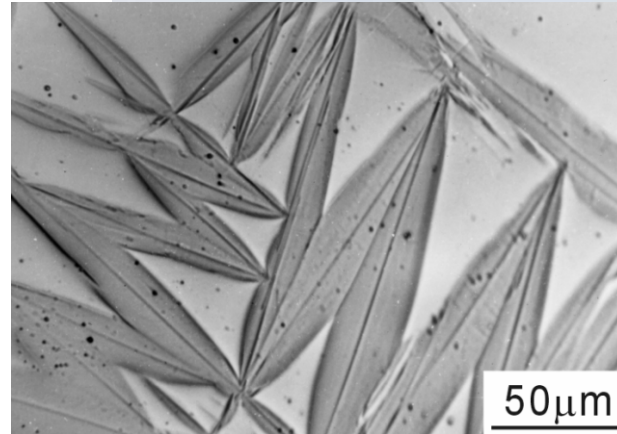
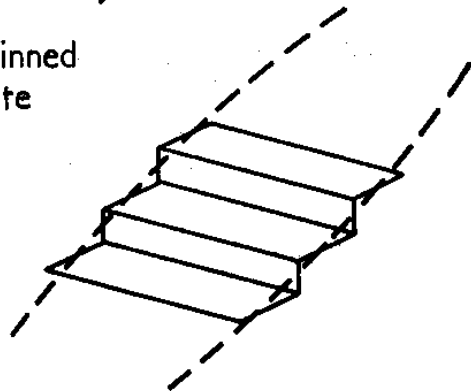
Christian, 1965

Лентікулярний та тонкопластинчатий мартенсит

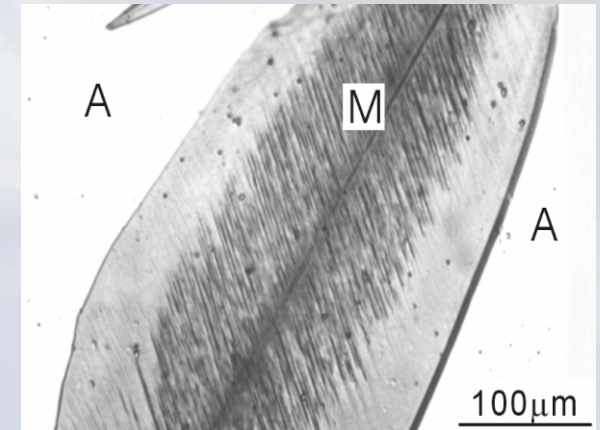
Internally slipped
martensite plate



Internally twinned
martensite plate



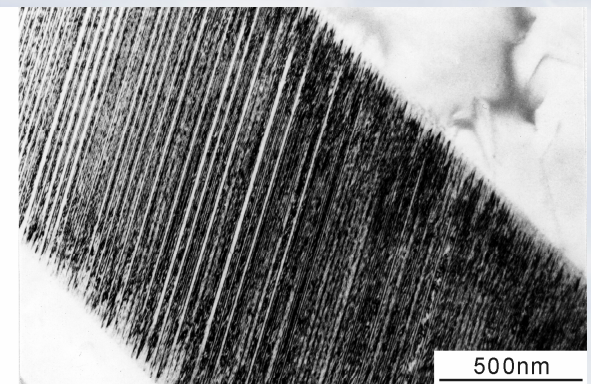
Fe-29%Ni-0.26%C ($M_s=203\text{K}$)



Fe-31%Ni-0.28%C ($M_s=192\text{K}$)



Optical micrograph
(Fe-31Ni-0.23C)



TEM micrograph
(Fe-30Ni-0.42C)

Самоаккомодация за рахунок доменів різної орієнтації

- Типовим для мартенситу є аккомодация пружних напружень на границі кристалу або за рахунок доменізації кристала – розбивання його на домени (двійники) із різною орієнтацією відносно аустеніту

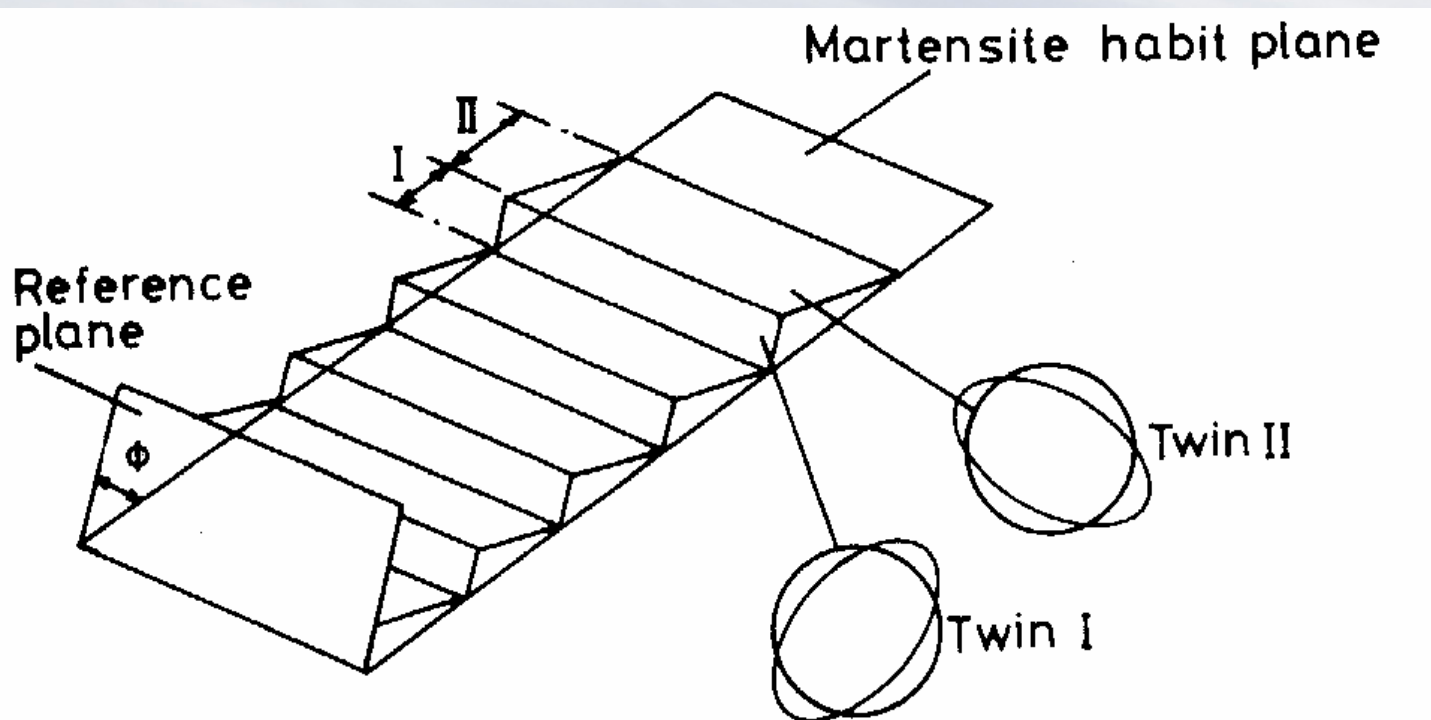
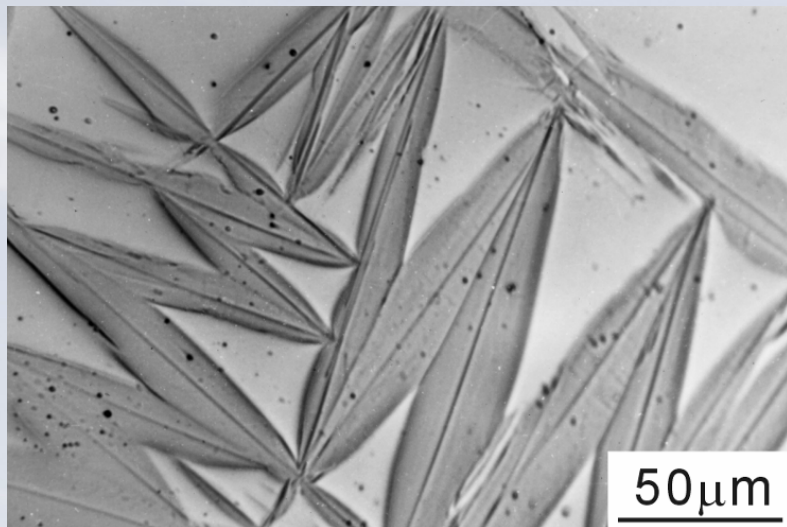


Fig. 6.10 Twins in martensite may be self-accommodating and reduce energy by having alternate regions of the austenite undergo the Bain strain along different axes.

Самоаккомодация за рахунок різної орієнтації сусідніх мартенситних кристаллів

- Інша можливість полягає в різній орієнтації і, відповідно, різним напрямком макроскопічного зсуву в сусідніх мартенситних кристалах
- В такому випадку не спостерігається загальної зміни форми матеріалу



Fe-29%Ni-0.26%C ($M_s=203\text{K}$)

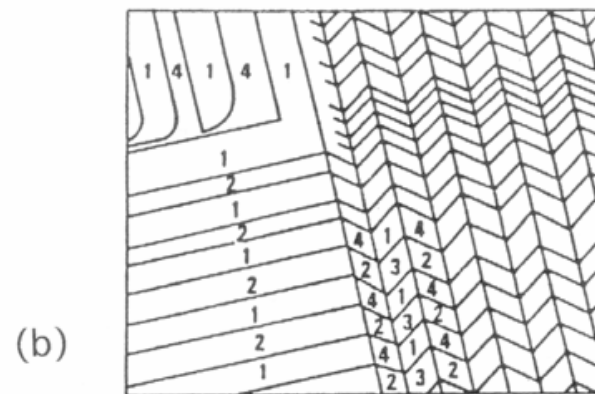
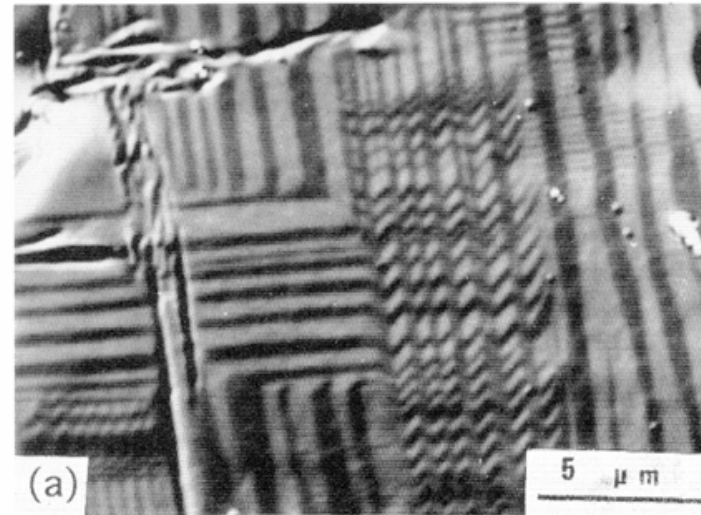
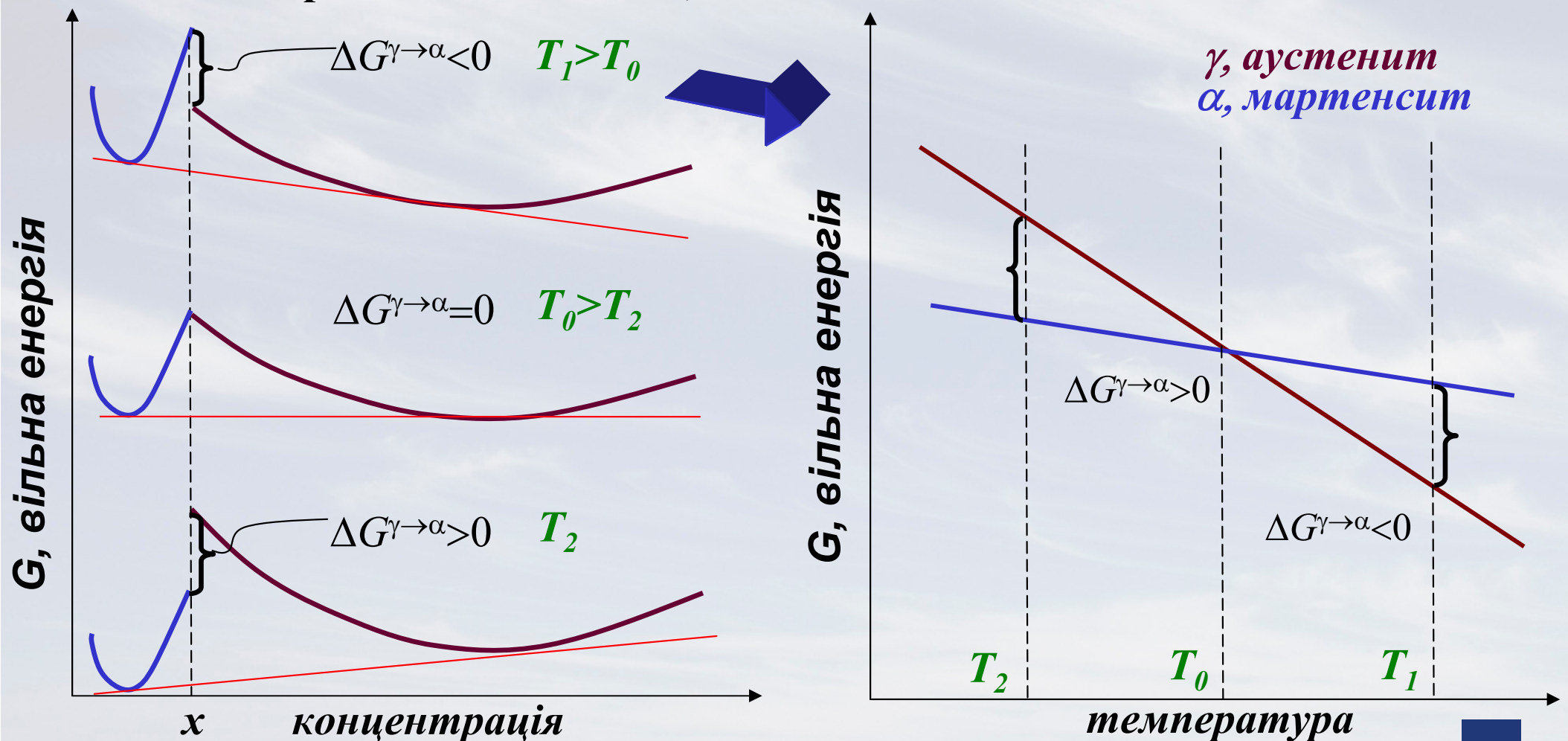


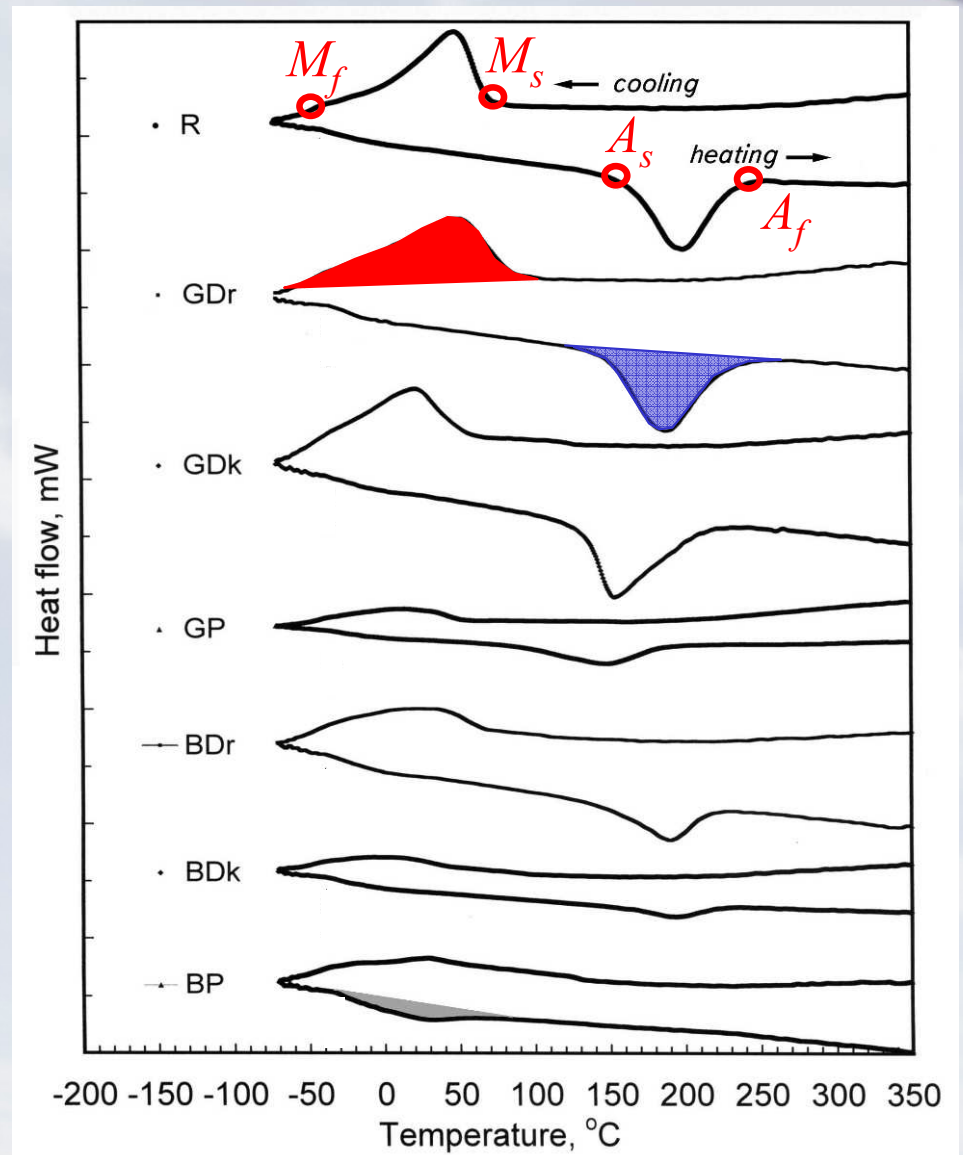
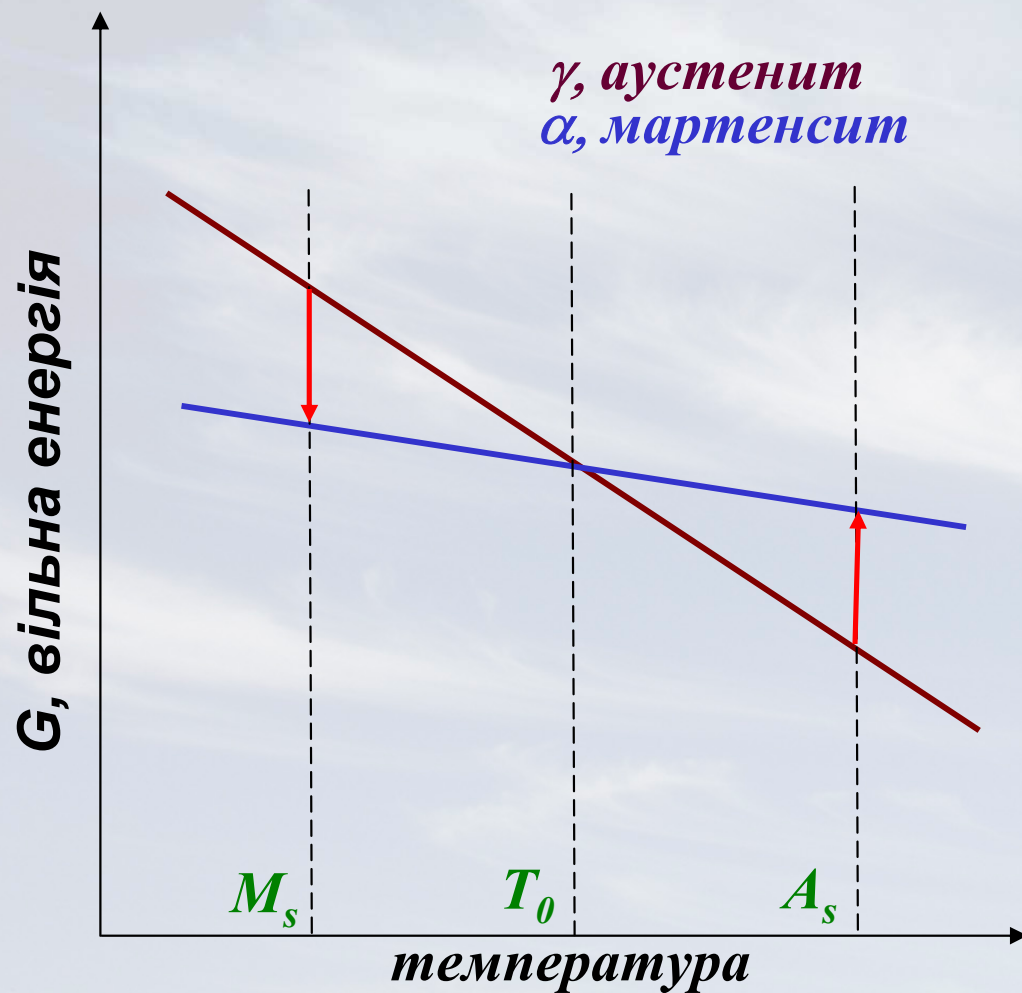
Fig. 3.33. Optical micrograph of self-accommodation of the R-phase (Ti-48.2Ni-1.5Fe (at%) alloy). (After Fukuda *et al.*³⁴)

Бездифузійність МП

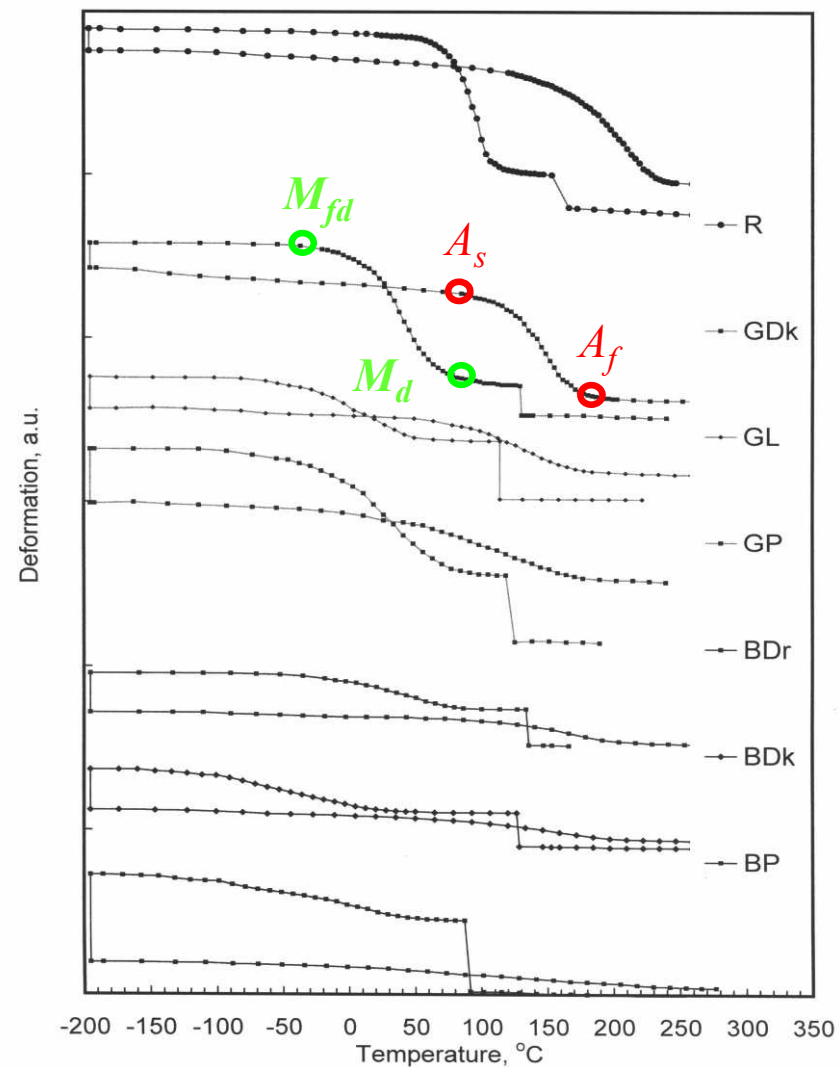
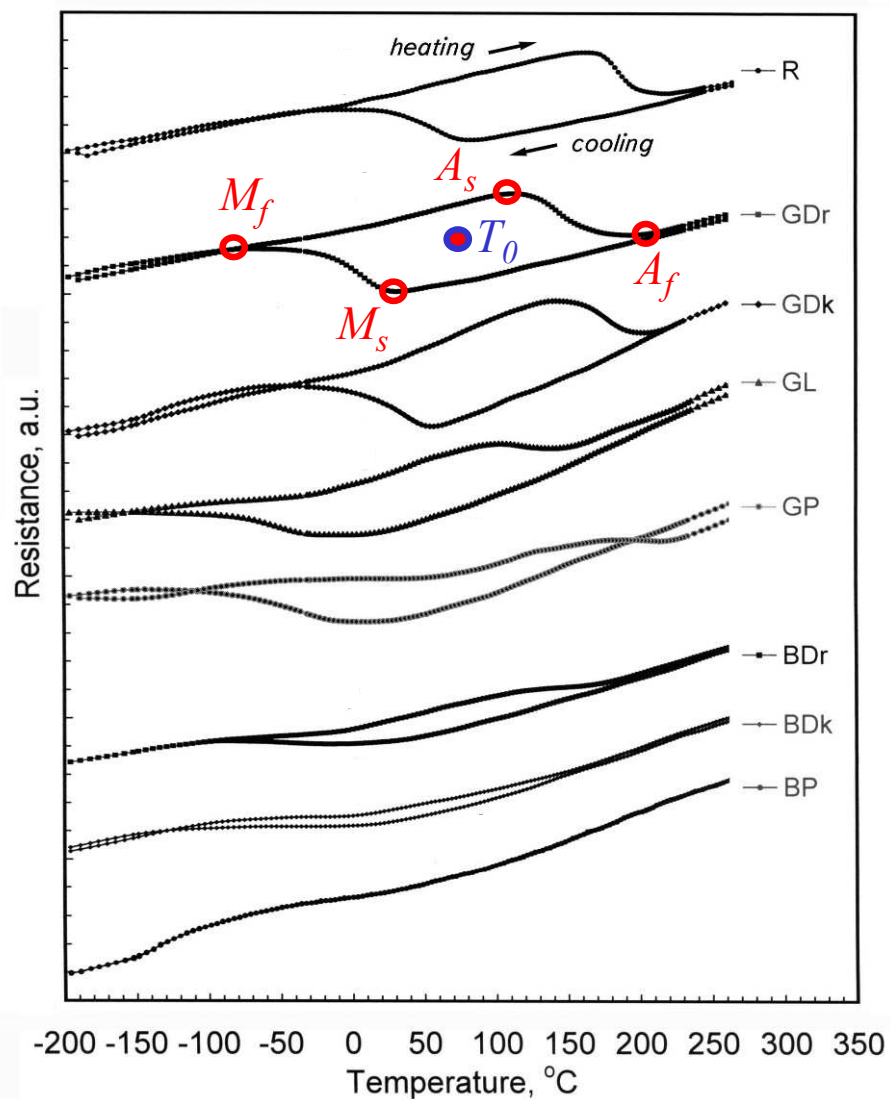
- Мартенситні перетворення мають місце в метастабільних системах, як правило при температурах, коли дифузійні процеси загальмовано
- МП можна розглядати як таке, що іде в однокомпонентній системі



Термодинаміка МП. Теплота переходу

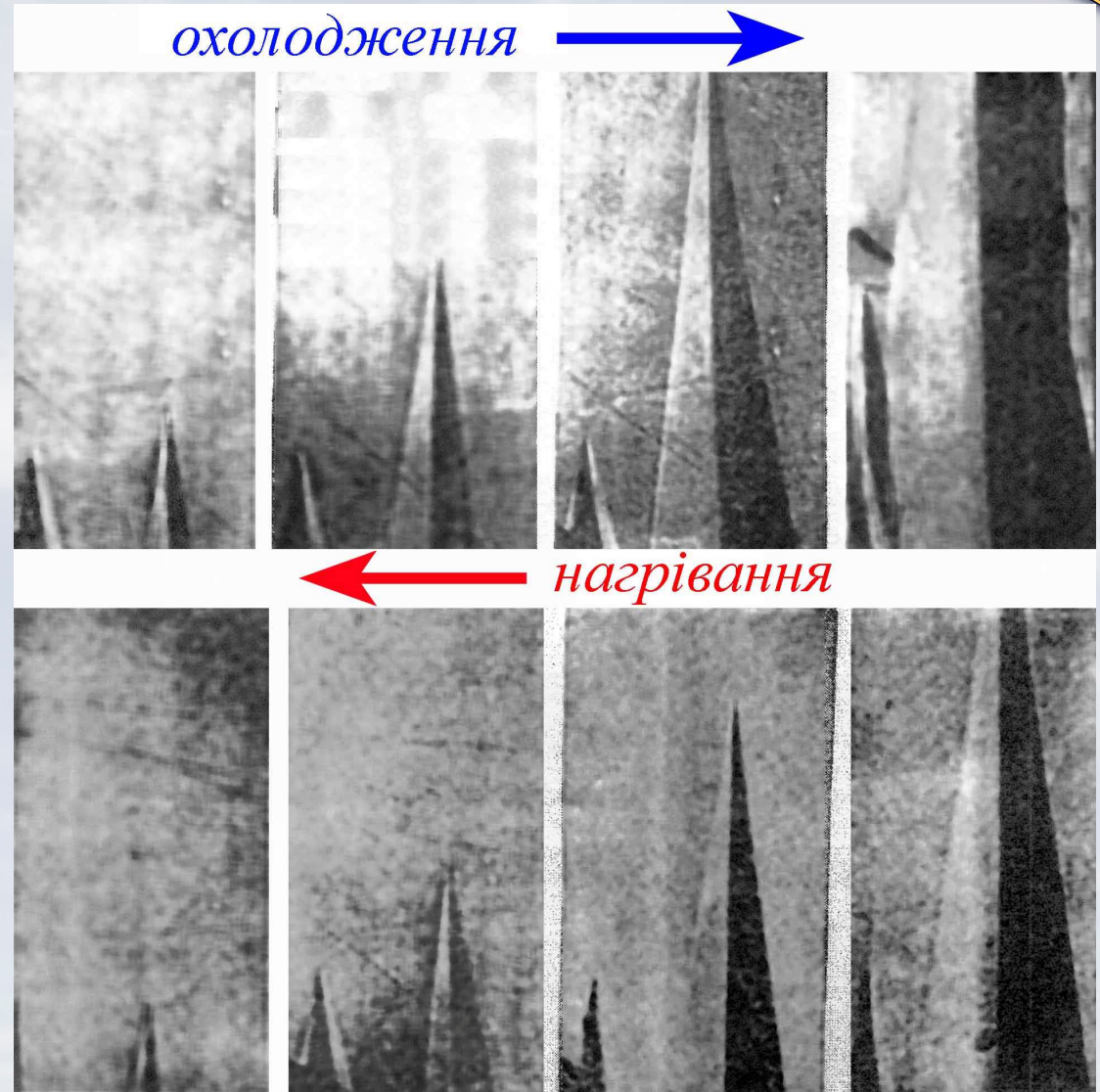


Температурний гістерезис властивостей



Термопружне МП. Оборненість перетворення

- МП є оборненим на мікроскопічному рівні
- Рух атомів при нагріванні є оборненим руху при охолодженні
- Оборненість рельєфу
- Відкриття №239
Г.В.Курдюмова та Л.Г. Хандроса *термопружного мартенситу* “Явление термоупругого равновесия при фазовых превращениях мартенситного типа -эффект Курдюмова»

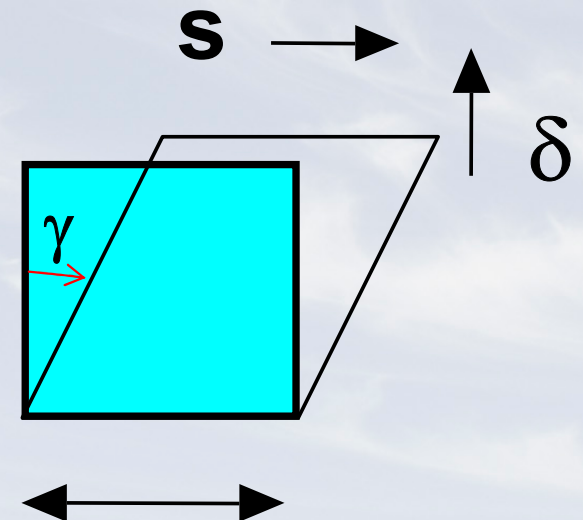
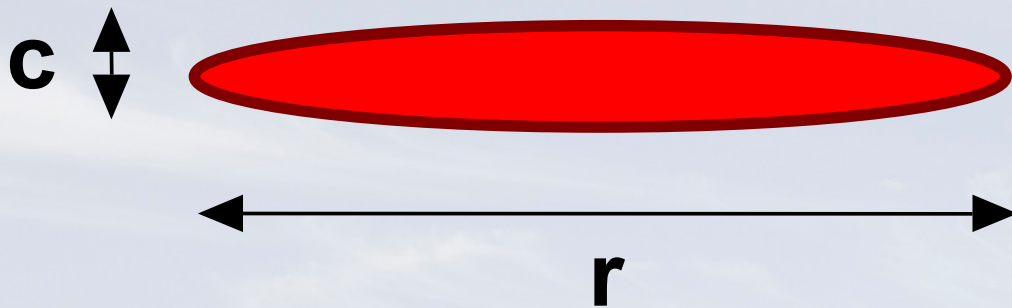


Термопружня рівновага

● $\Delta G = -\Delta G_{ch} r^2 c + 2\sigma r^2 + \mu \gamma^2 r c^2$

– де ΔG_{ch} – різниця енергії ґратниці аустеніта та мартенситу, σ – енергія поверхні (границі), μ – пружний модуль

● $c/r = \Delta G_{ch} / 2\mu \gamma^2$



Найбільш поширений матеріал з пам'яттю форми - *нітінол*

- Відкритий в Naval Ordnance Laboratory
- Найбільш поширений завдяки виняткового сполучення функціональних властивостей (пластичність, міцність, коррозійна стійкість, біосумісність)

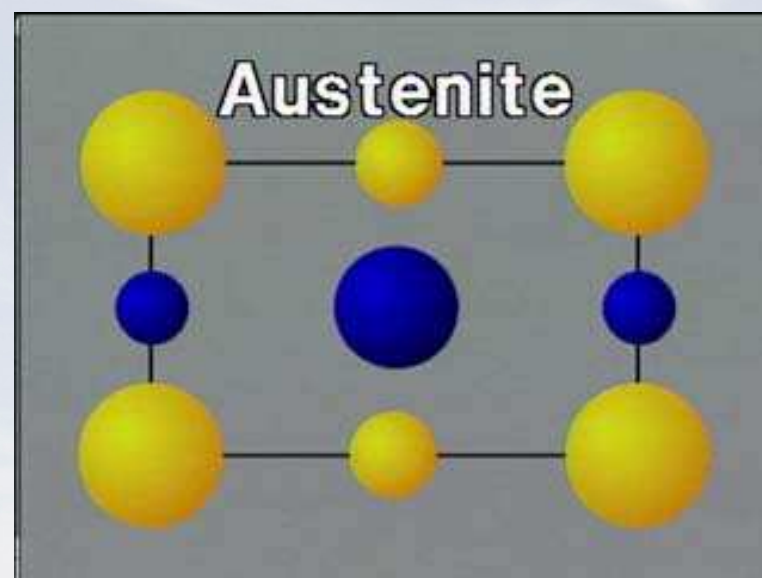
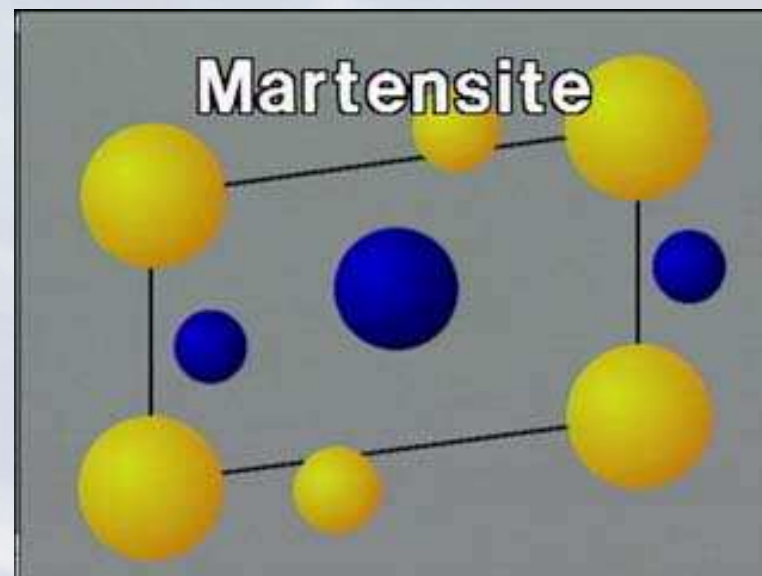
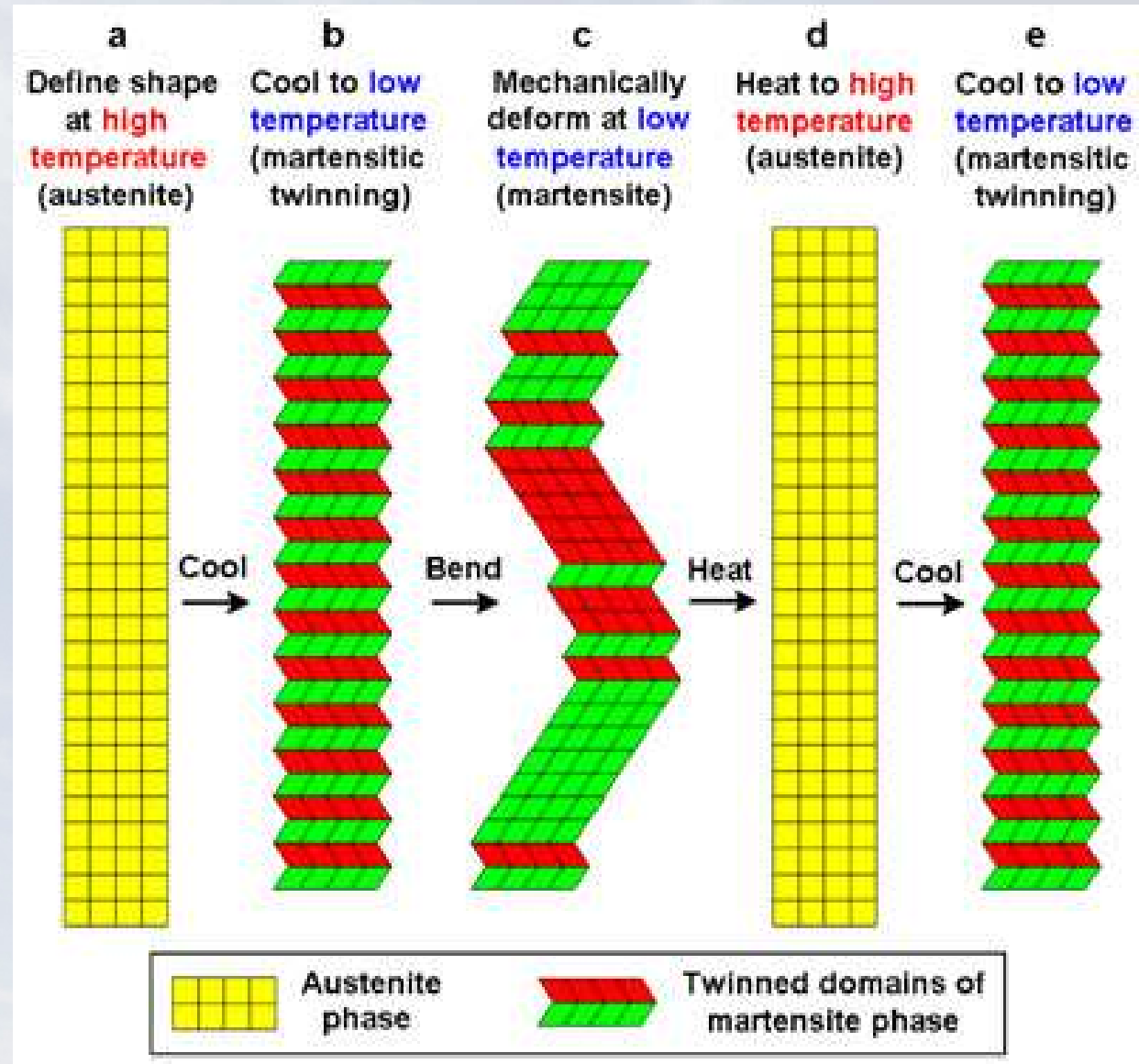


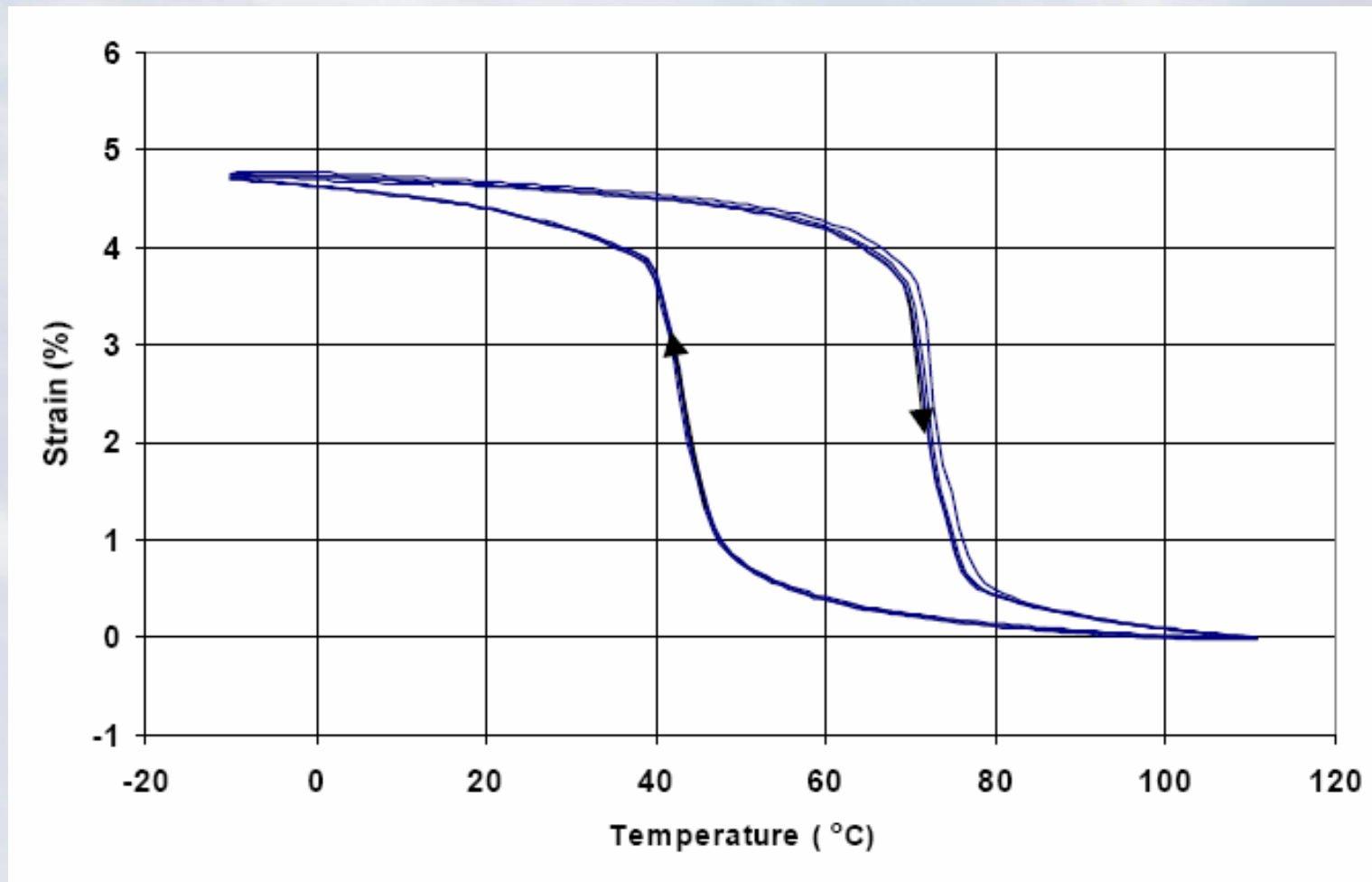
Схема ефекту пам'яті форми

- Охолодження без навантаження – самоаккомодація
- Механічне навантаження під час охолодження або при низьких температурах – деформація
 - зміна співвідношення товщини доменів
 - вибір найбільш прийнятних варіантів
- Нагрівання – відтворення форми

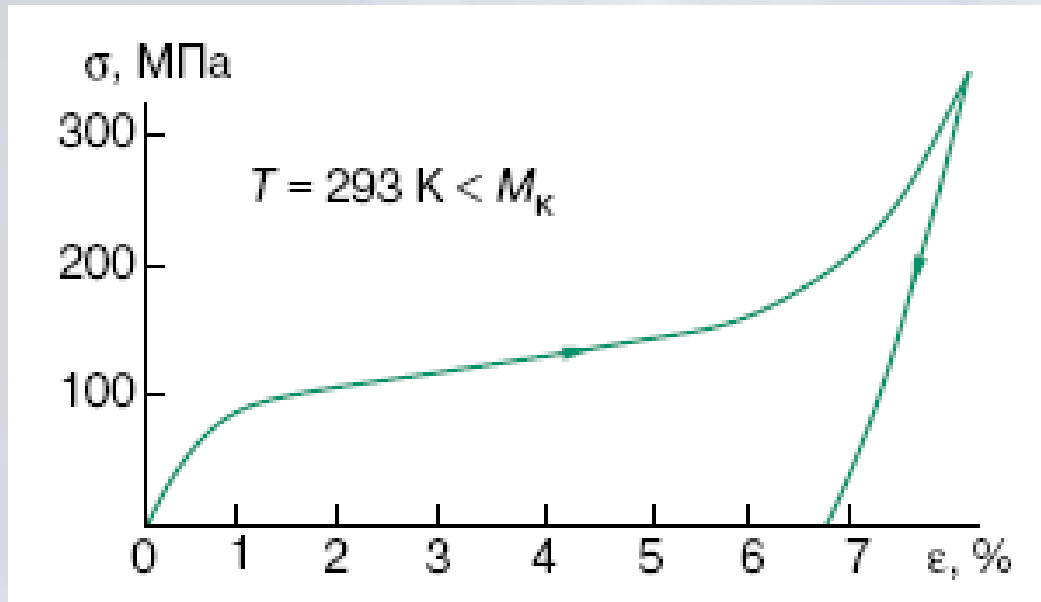


Залежність деформації від температури – охолодження при сталому навантаженні

Нітінол



Що відбувається якщо деформувати в мартенситному стані – при сталій температурі



Навантаження при температурі менше ніж M_s приводить до пластичної деформації. Мартенсит стає роздвійникований і домінують тільки декілька варіантів кристалів мартенситу

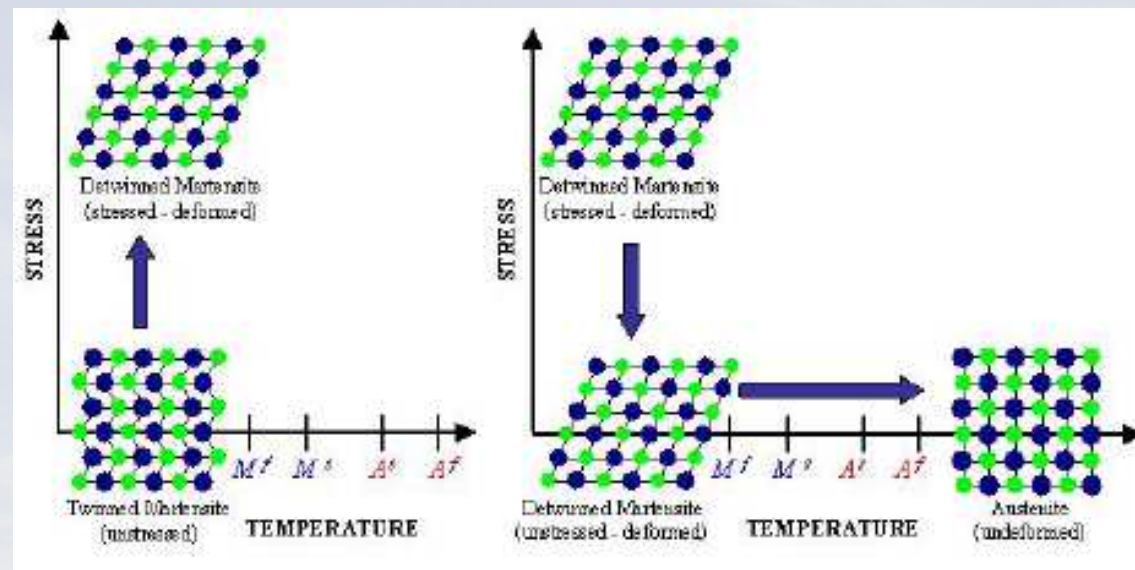


Схема ефекту пам'яті форми та ефекту псевдопружності

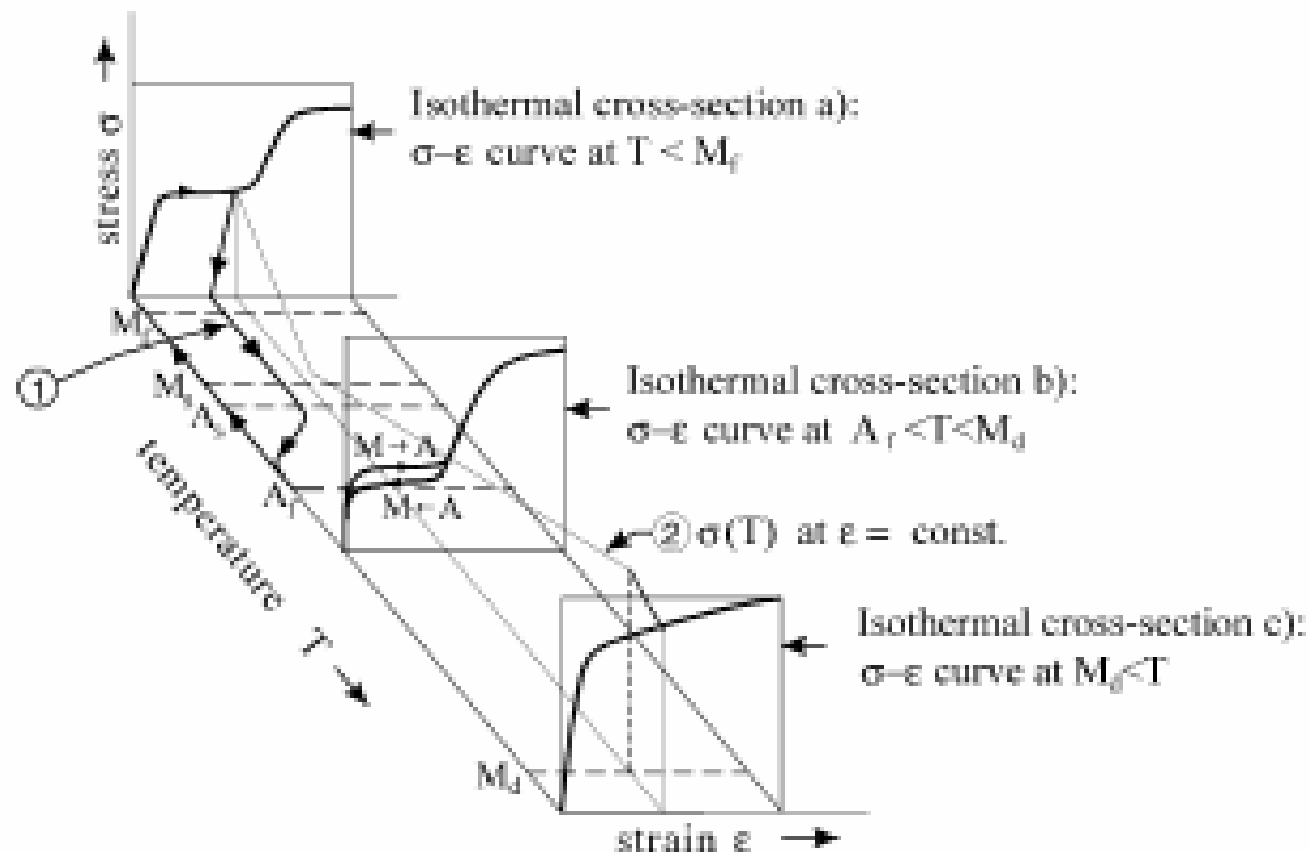


Fig. 2. Schematic illustration of the temperature-dependent mechanical behaviour of shape memory alloys [18]: isothermal cross-section (a) and curve (1)—one-way shape memory effect; isothermal cross-section (b)—pseudoelasticity; isothermal cross-section (c)—conventional behaviour at $T > M_d$; curve (2)—stress vs. temperature at constant strain.

Використання матеріалів із пам'яттю форми

Матеріали з пам'яттю форми

Ефект пам'яті форми

Реле, ключі

Актuatorи

Фітінгі

Пожежні сигналізатори

Руйнівачі скель

Ефект псевдопружності

Анени

Рамки окулярів

Ендопротези

Імплантанти

Медичні інструменти



Авіація

Аерокосмічна галузь

Автомобілебудування

Машинобудування

Побутова техніка

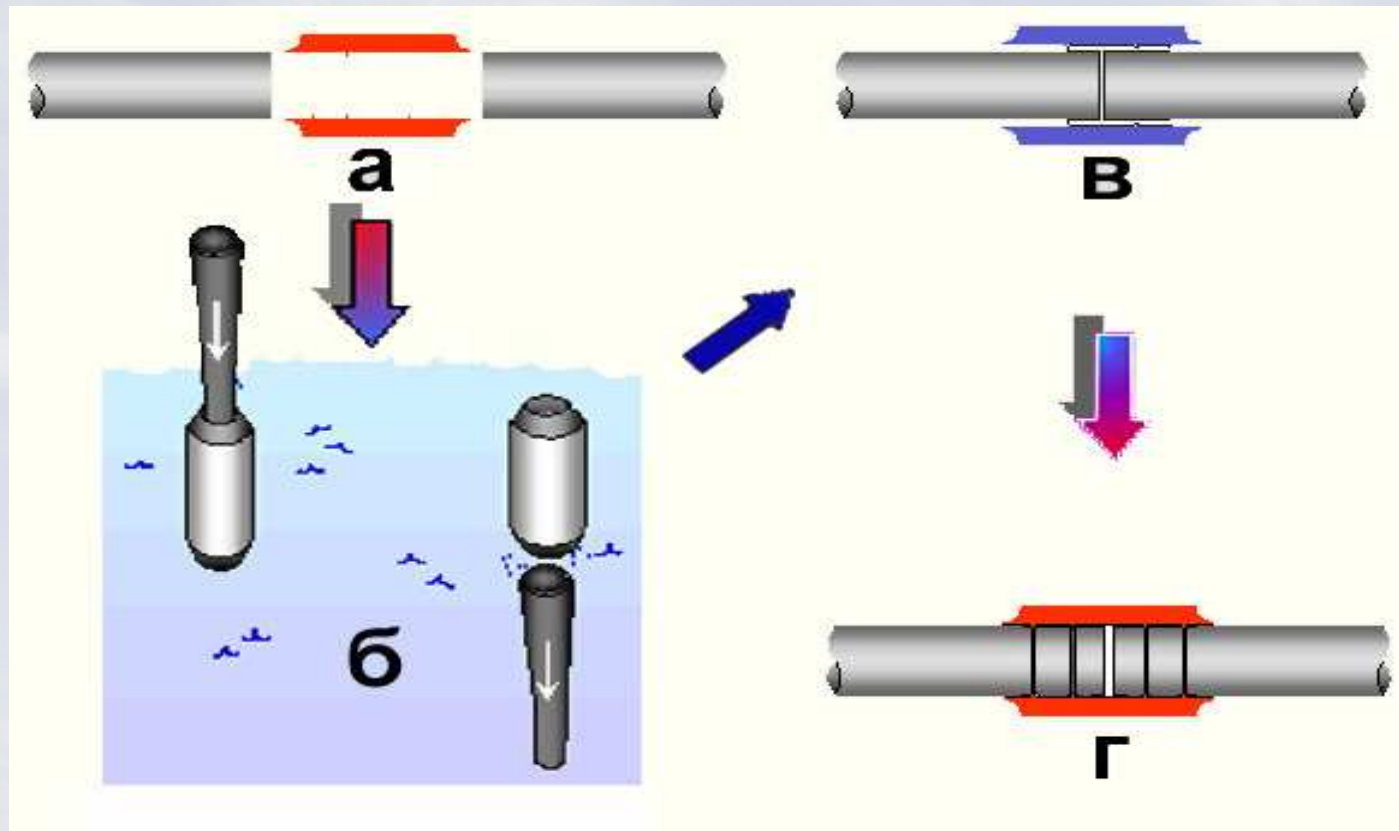
Безпека

Медицина

Робототехніка

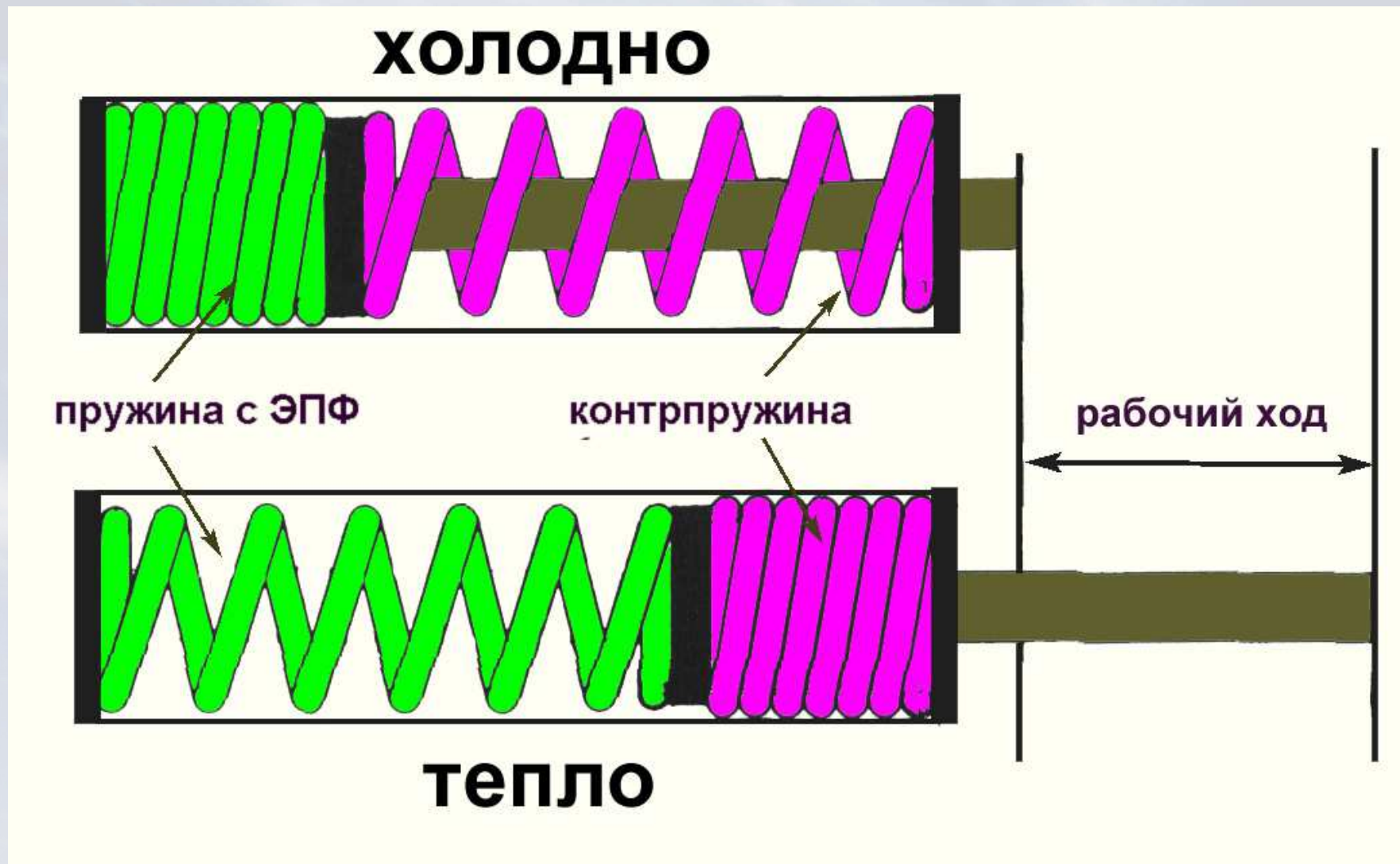
Фітінгі

- Перше найбільш вражаюче використання матеріалів з пам'яттю форми – кріофітінгові з'єднання
- *Кріофітінгі* – механічні безрізьбові з'єднання труб без використання зварки та пайки
- Вперше використано на американських винищувачах F-14, бомбардувальниках B1-B, B2 (1970-1980 р.р.), пізніше на радянських бомбардувальниках Ту-204, Ту-334
- За 30 років експлуатації із 10000 фітінгів встановлених на F-14 не було зареєстровано жодної відмови

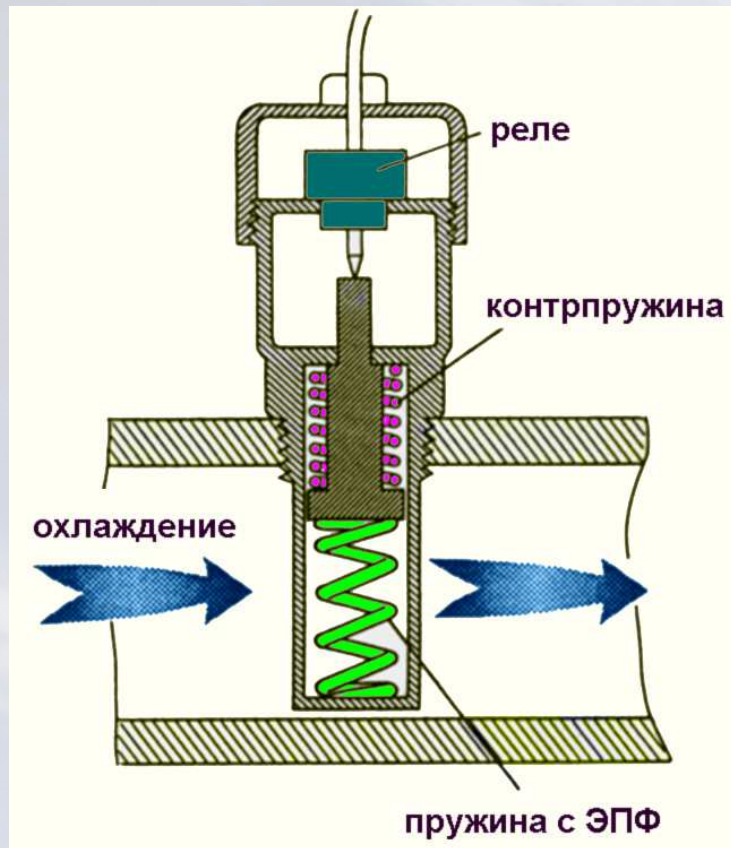


Терморегулятори, терморелє

Принципова схема терморегулятора

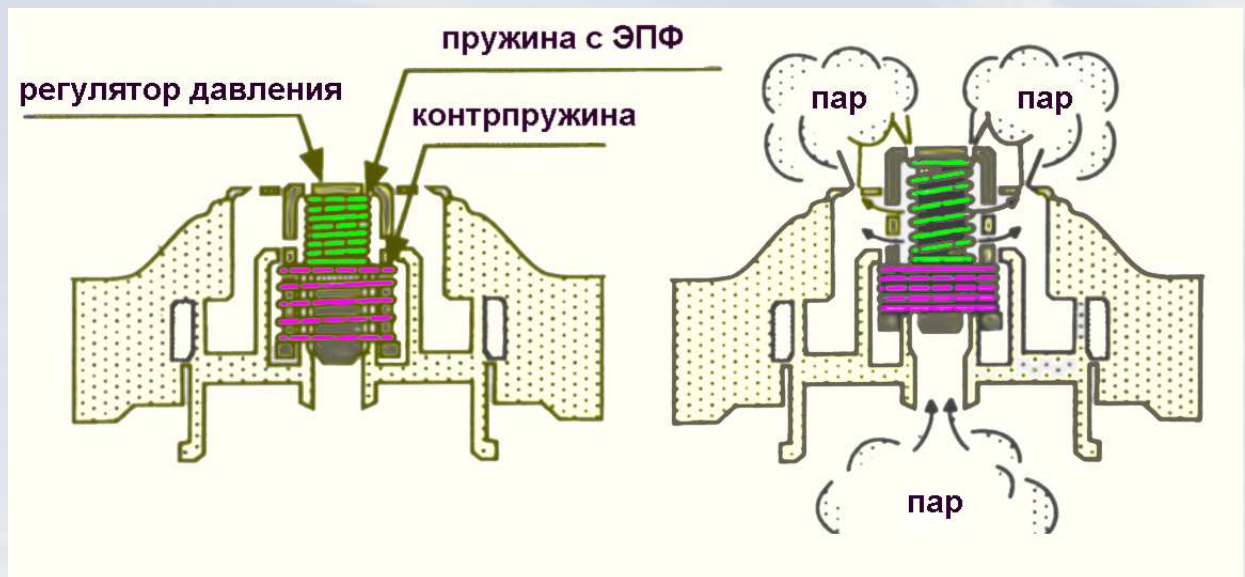


Реле - обмежувачі

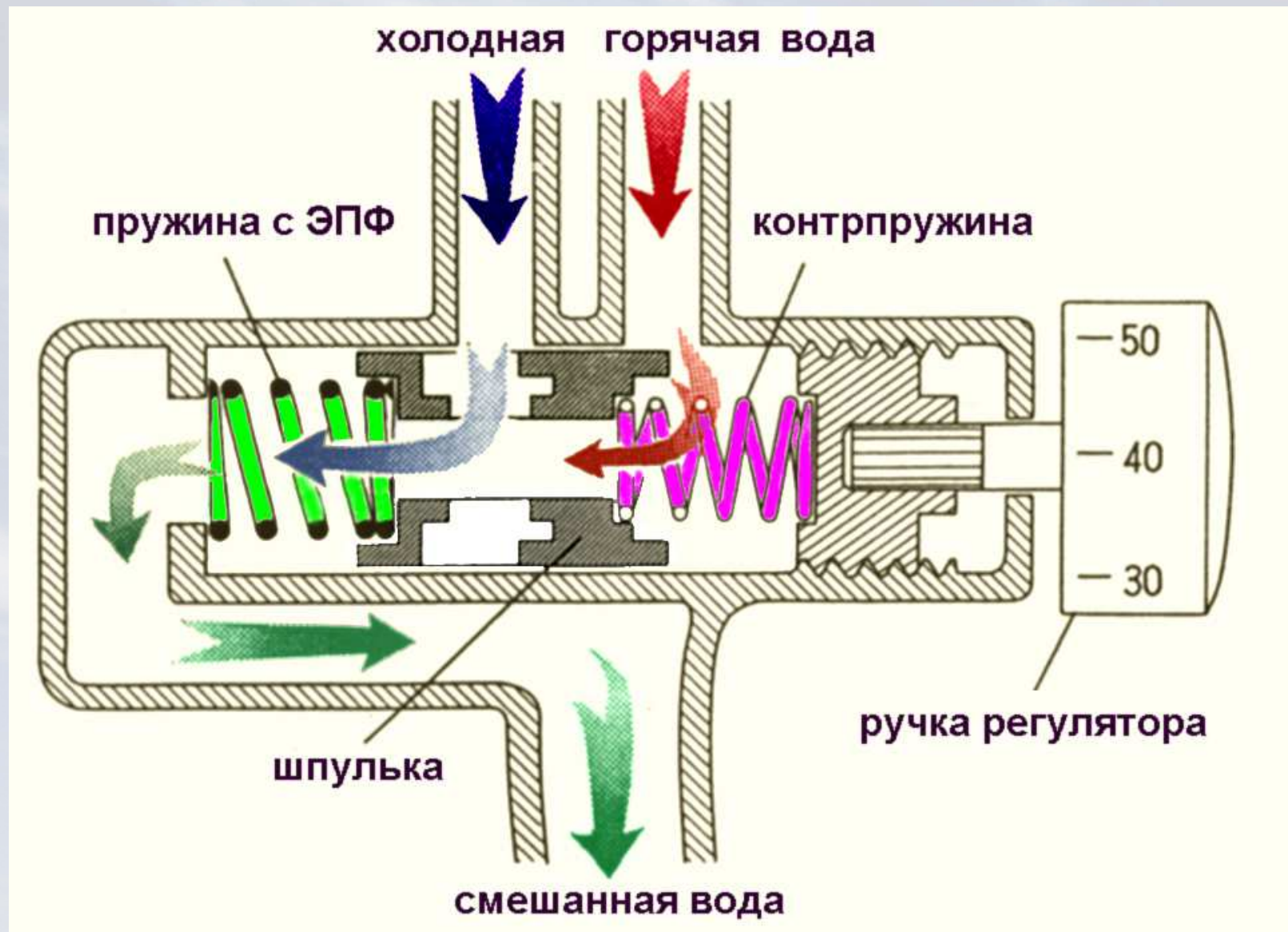


Під дією тепла або холоду пружина із матеріалу з пам'яттю форми деформується замикаючи (розмикаючи) контакти реле і тим самим запускаючи механізм керування

Інший варіант – під дією високої температури спрацьовує пружина із пам'ятті форми стравляючи надлишок пари



Реле-актуатор



Інтелектуальне реле

a



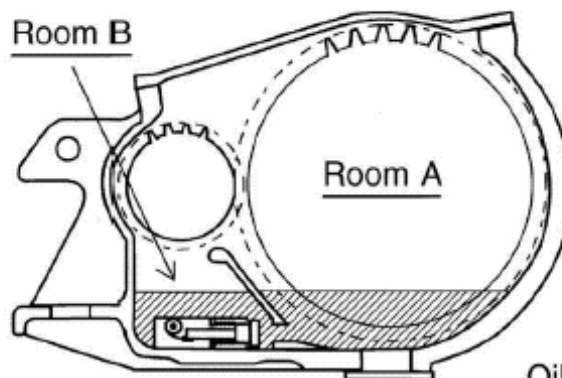
Швидкісний потяг
Shinkansen Nozomi-700;

На вставці показано
пристрій для
автоматичного
регулювання рівня
моторної олії в трансмісії

Основний елемент
пристрою – пружина із
пам'яттю форми

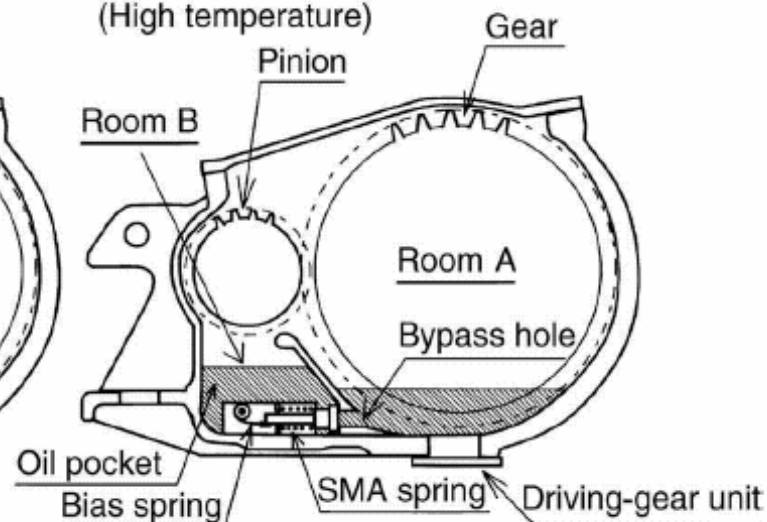
b

(Low temperature)



c

(High temperature)



Пристрій для безвибухової руйнації скель

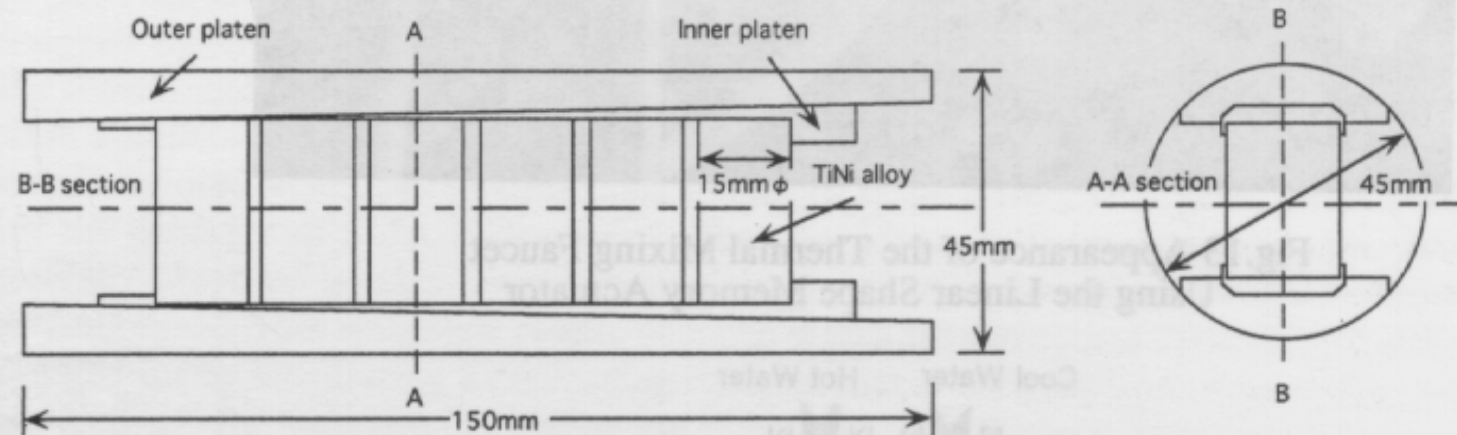
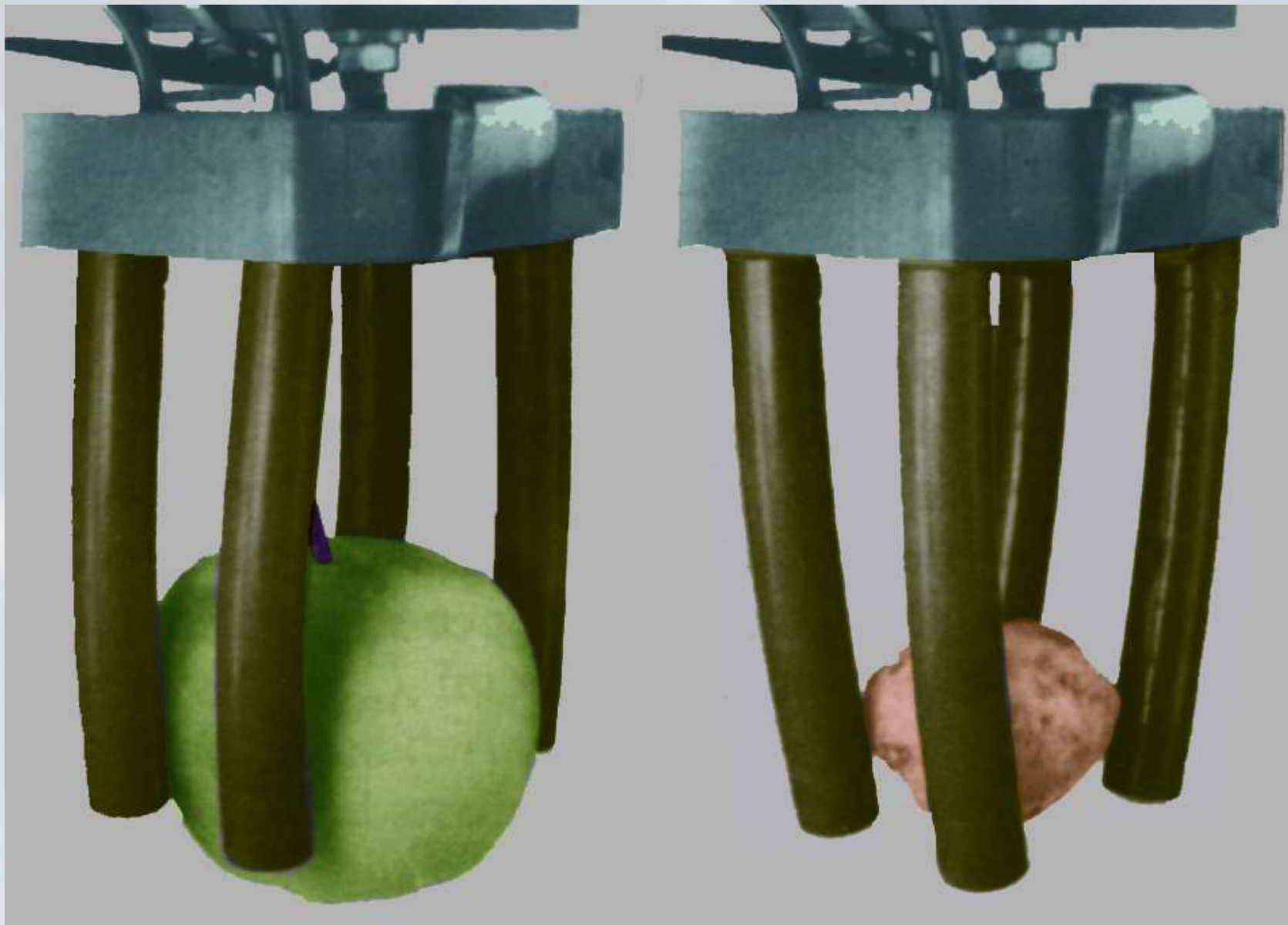


Fig.10 Schematic Drawing of a Static Rock Breaker



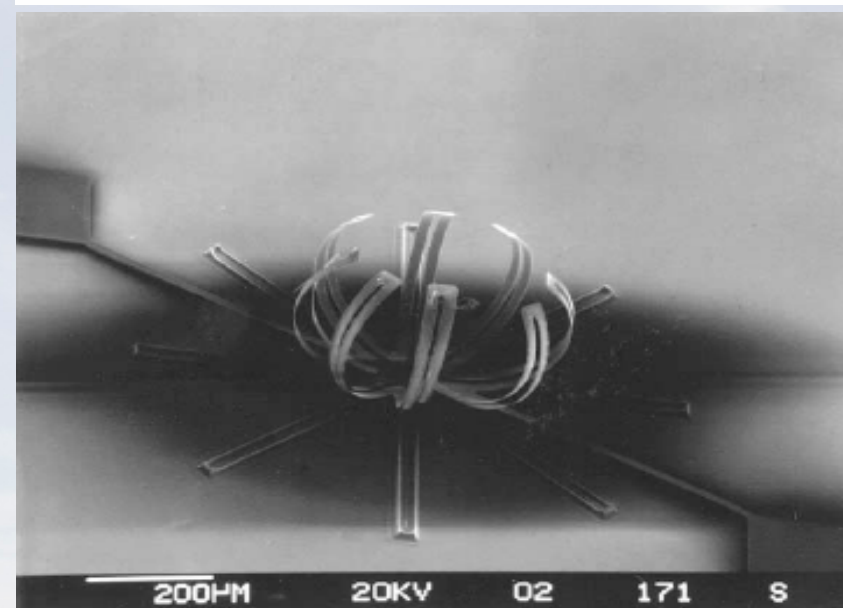
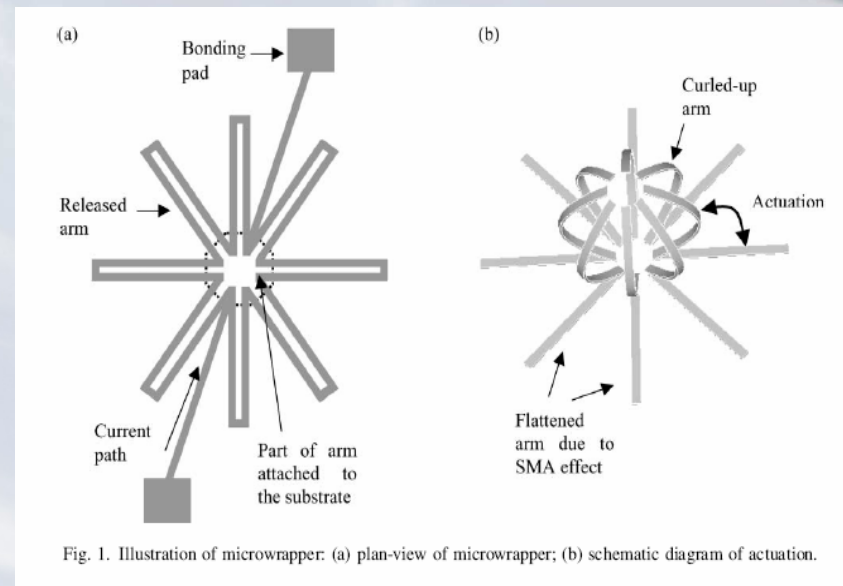
Fig.11 Granite Block Before and After Breaking with Use of the SMA Rock Breaker

Актуатор - захват



Мікроактуатор - захват

- Сучасні технології дозволяють розробляти та використовувати мініатюрні пристрої із матеріалів з пам'яттю форми
- В таких пристроях роль “контрпружини” виконують внутрішні напруження в матеріалі, що утворюються внаслідок попереднього тренування
- Кажуть про так званий *двосторонній ефект пам'яті форми*
- За рахунок джоулевого тепла пристрій набуває необхідної форми. Після охолодження набуває початкової форми



Аерокосмічні актуатори

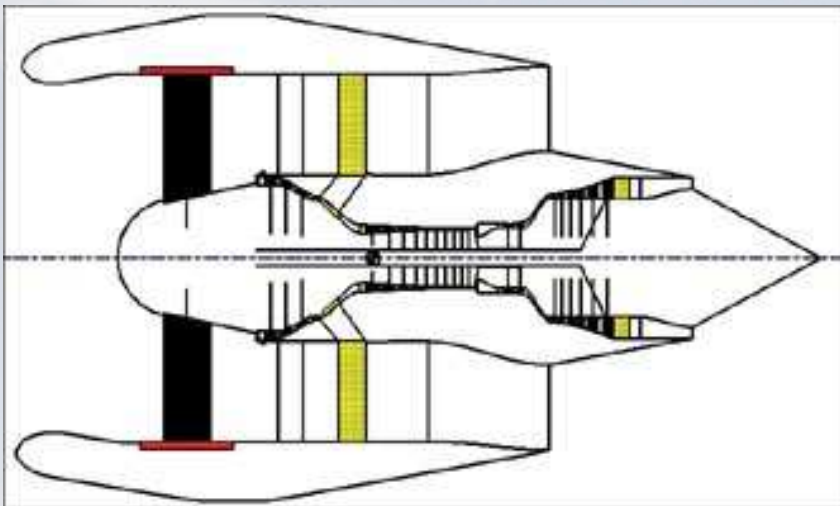
- Саморозгортаючіся антени
- Саморозгортаючіся соняшні батареї
- Пристрої розгортання засобів приземлення
- Пристрої фіксації



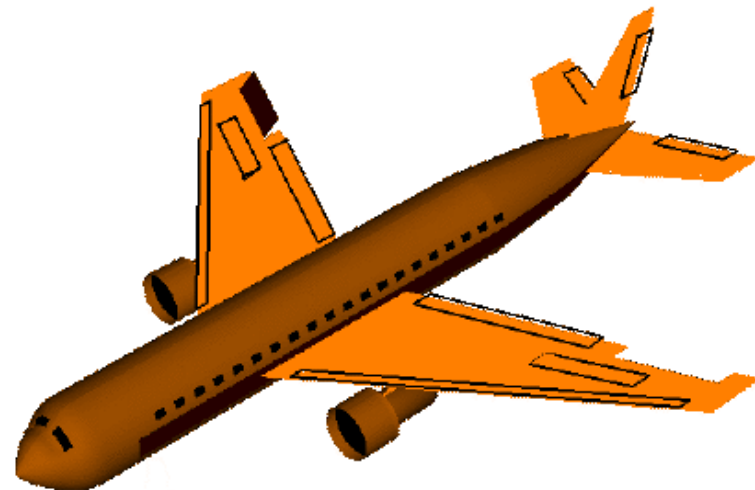
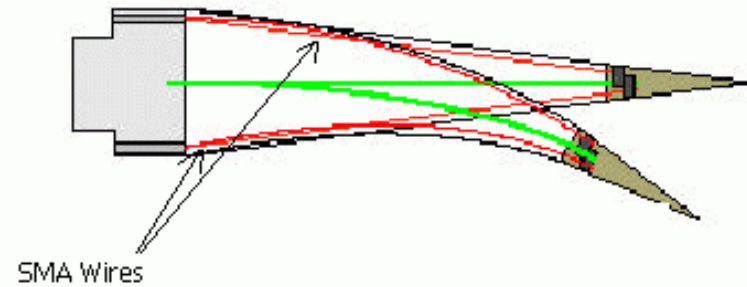
Авіація



Регульований профіль сопла



Регульований профіль крила

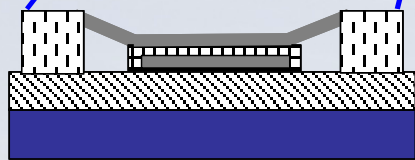


Звичайно військова сфера

Фазована антена

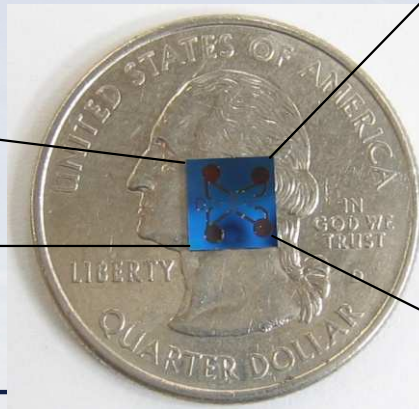


U.S. Army

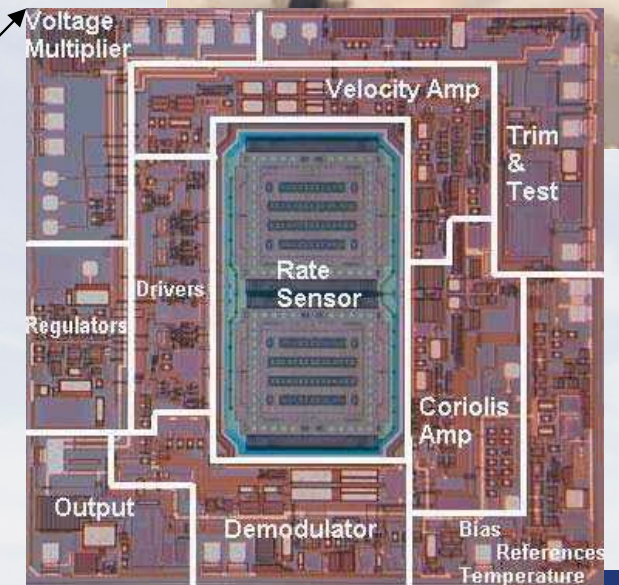


Пристрій наведення
по проміню
Ударний датчик
 10^5 G-Force
10 kHz

Необхідна висока
демпфуюча
спроможність в
малих об'ємах

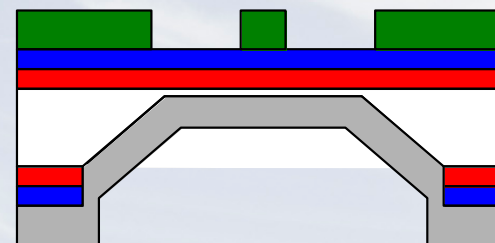
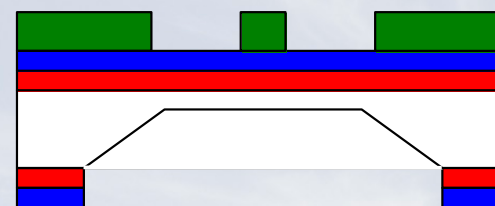
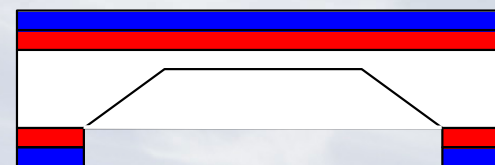
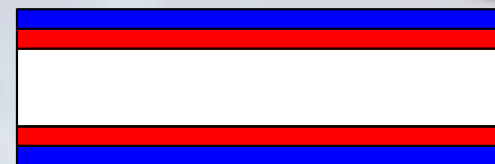
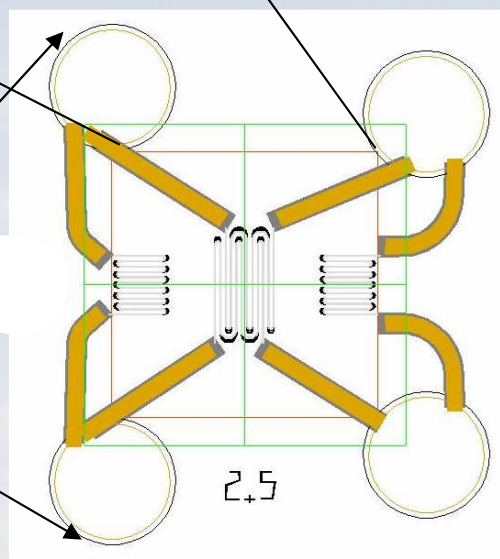
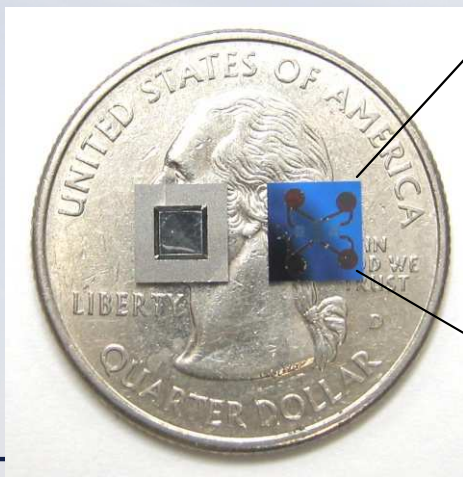
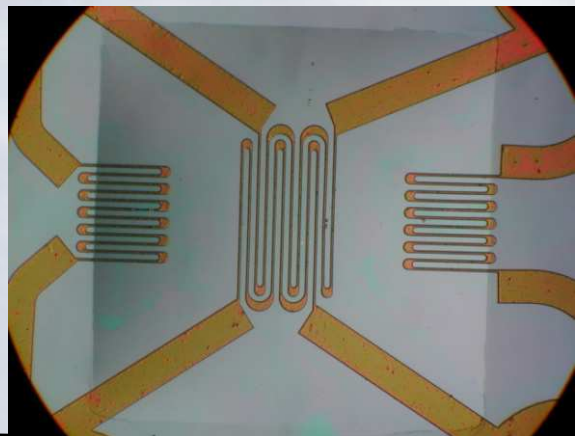


Акселерометр



Демпфер акселерометра

Висока демпфуюча спроможність TiNi (надпружність)



0.15 μm LPCVD SiN_x 1 μm Cu
0.1 μm SiO_2 10 μm NiTi

Робототехніка

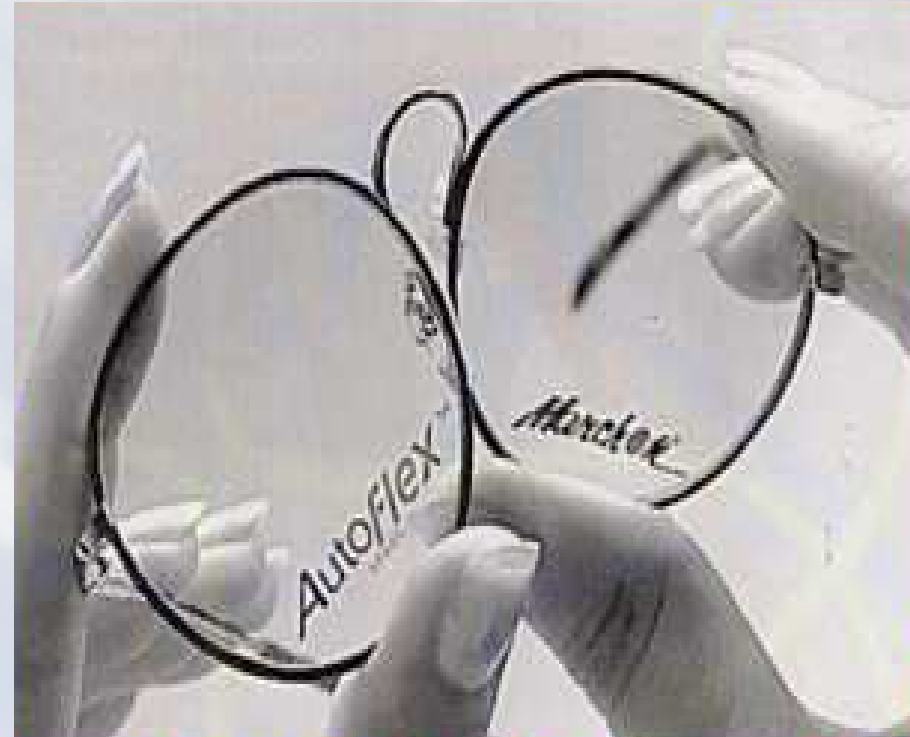


- Тонкі дроти із нітінола виконують роль м'язів в штучній руці
- Іграшковий метелик



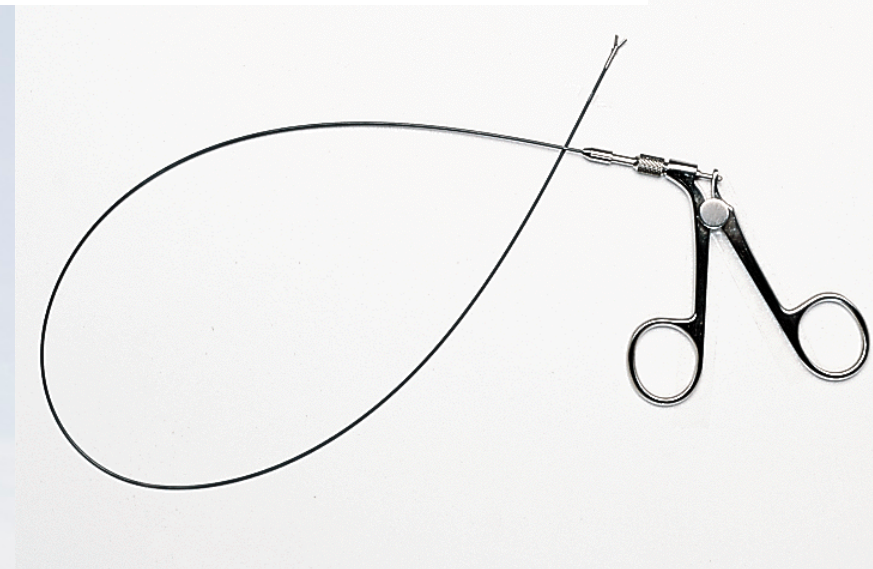
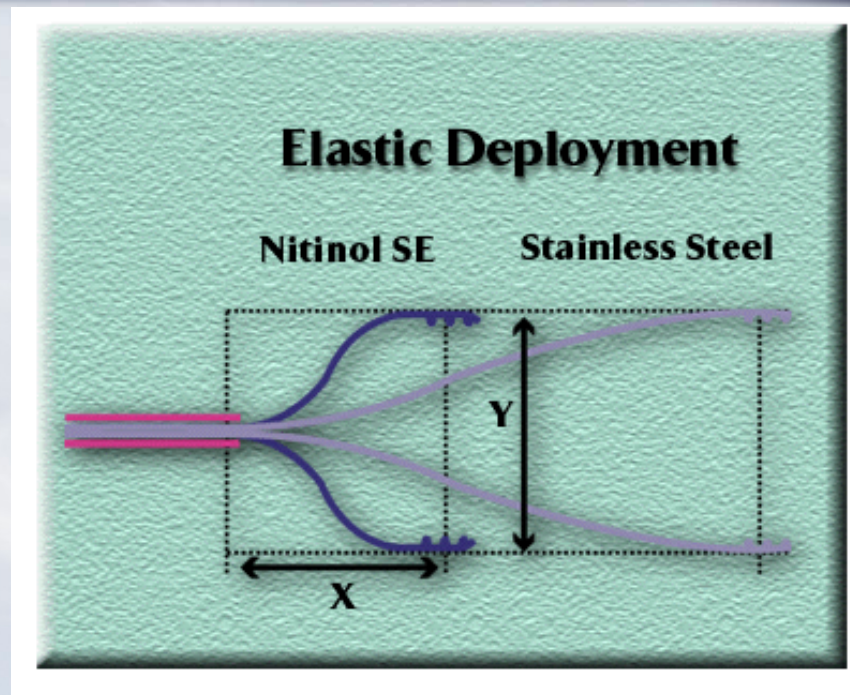
Висока пружність матеріалів з пам'яттю форми

- Рамки для окулярів
- Антени для мобільних телефонів
- Кінчики для риболовних спінінгів

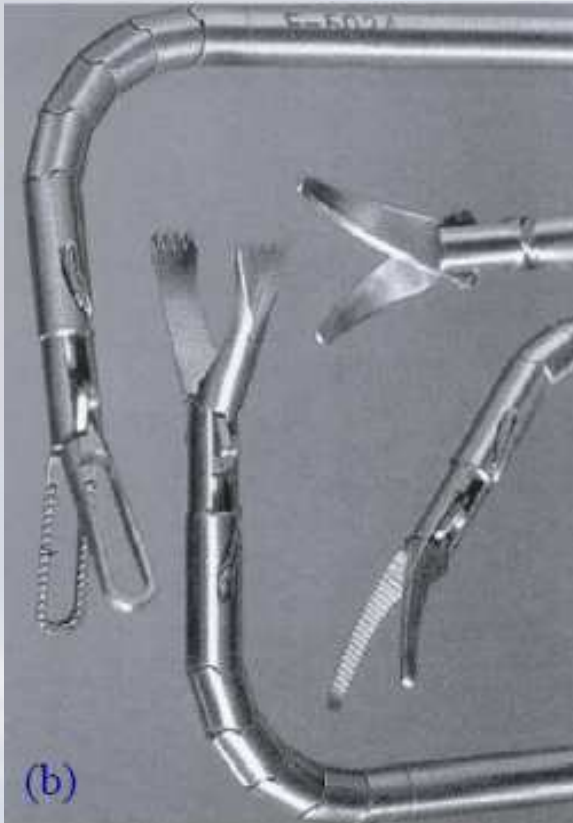


Медицинський інструмент

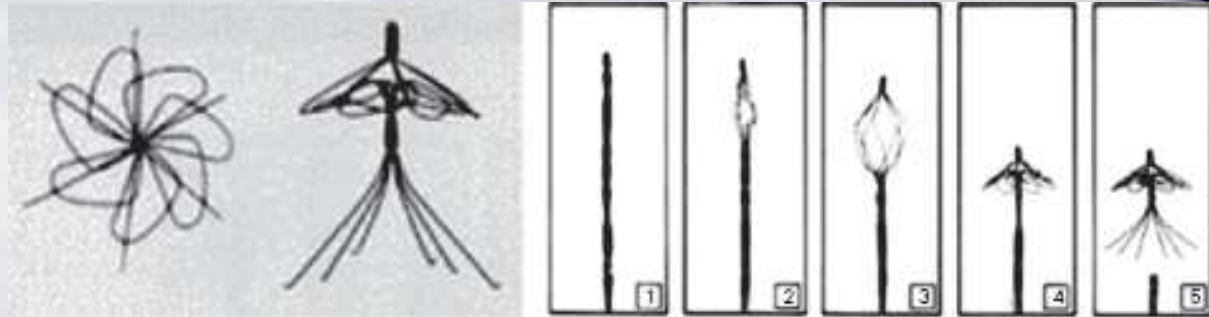
- Інструменти із пам'яттю форми, зокрема нітінол забезпечують більше руху для захоплення і відповідно є компактніше у порівнянні із звичайними інструментами
- Катетори
- Затискачі
- Захвати
- Хірургічні голки
- Спеціальні пінцети
- Всюди де необхідно провести інструмент через тонкі отвори (канали)



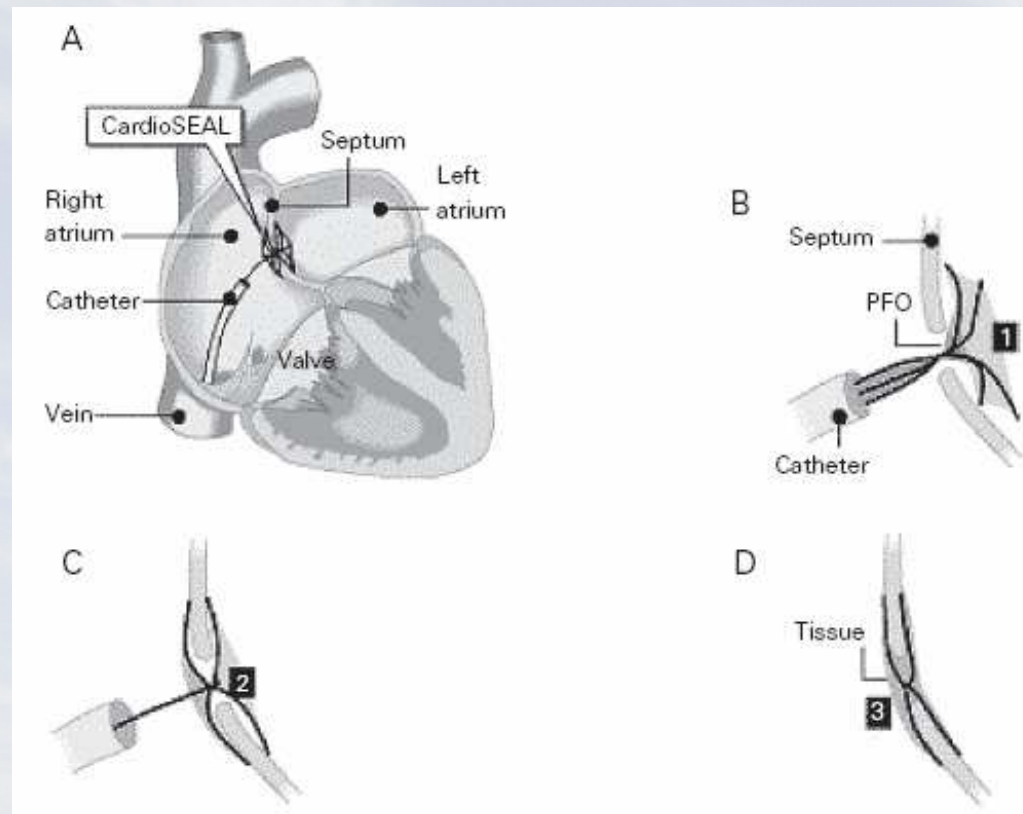
Матеріали з пам'яттю форми в медицині



Захвати різного типу



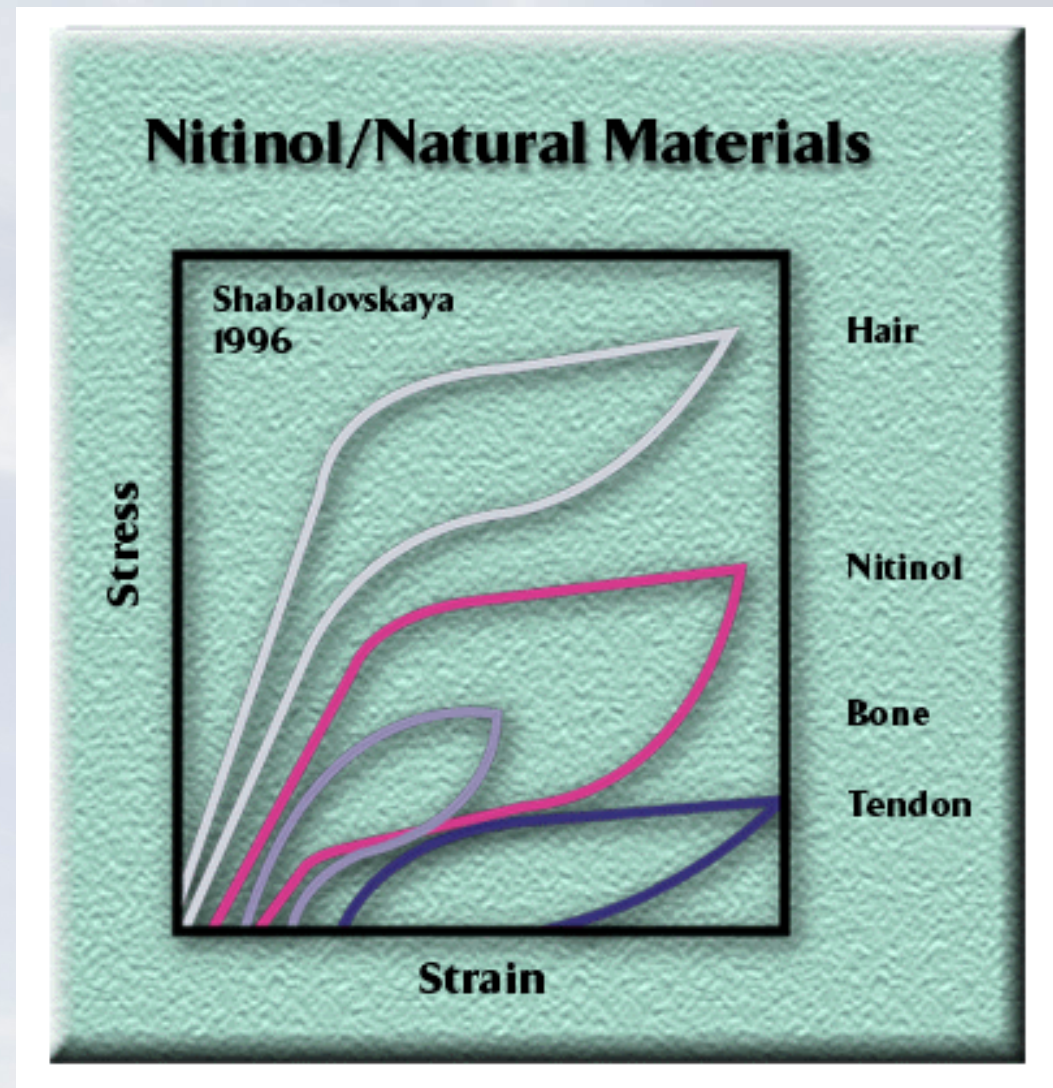
Фільтри тромбів



Atrial septal occlusion device.

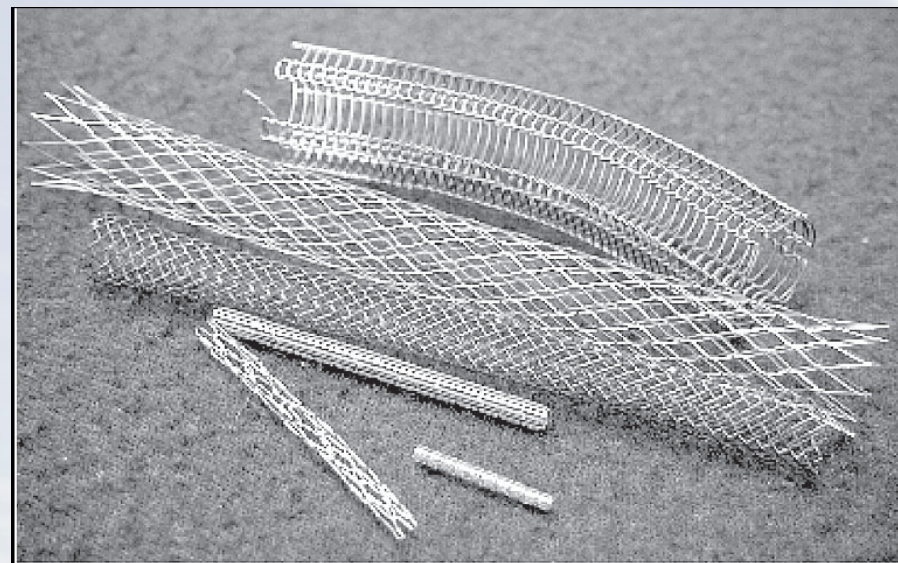
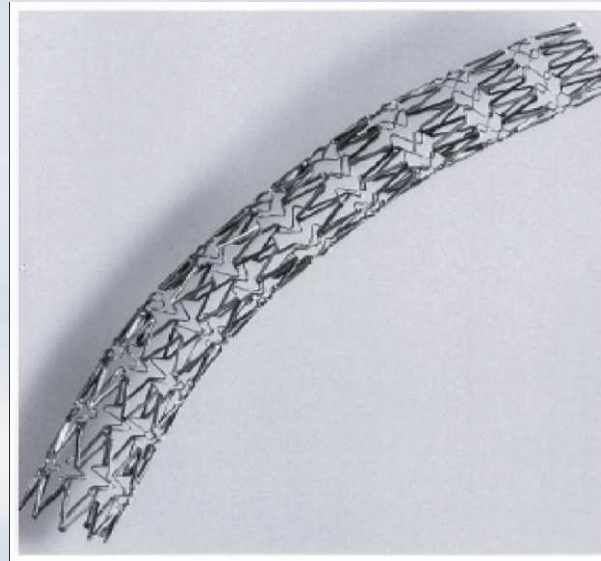
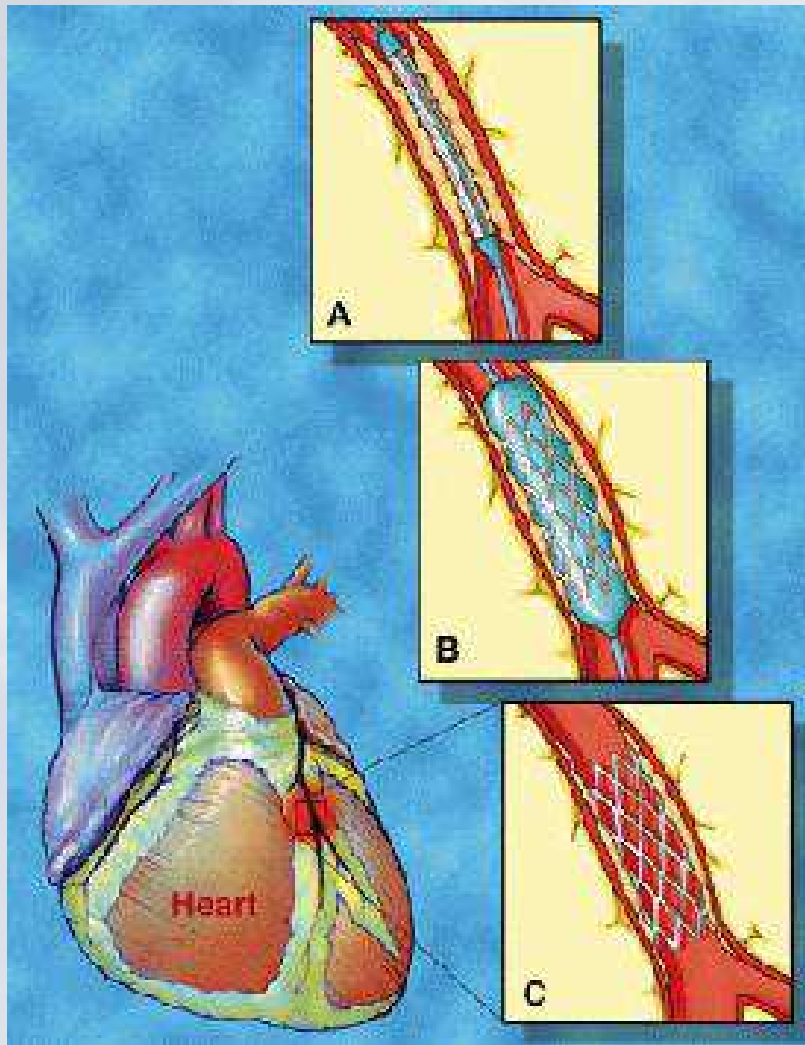
Ендопротези та імпланти

- Висока біосумісність
- Висока корозійна стійкість
- Подібність механічних властивостей біотканин та нітінолу

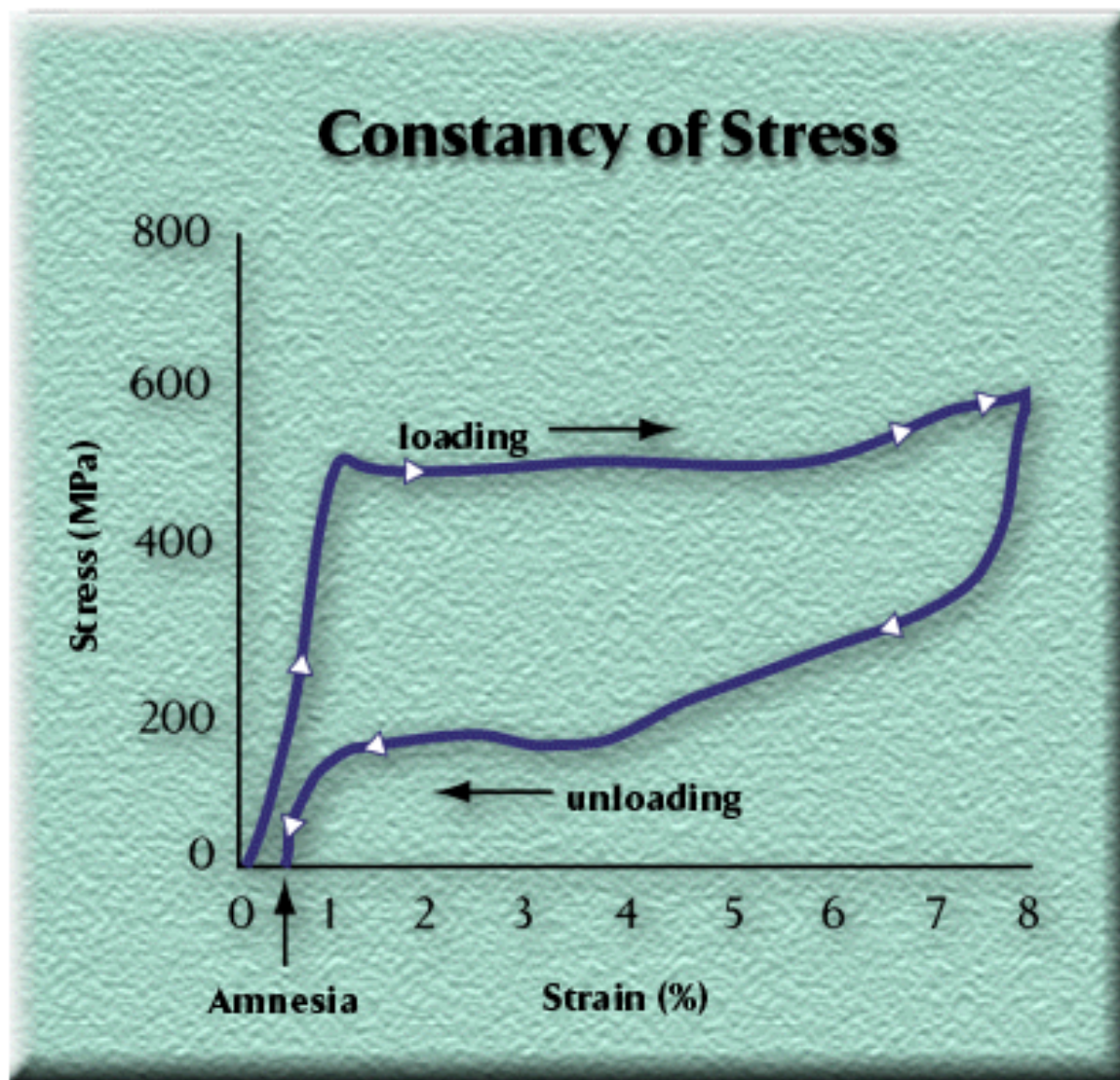


Ендопротези

Та схема їх використання

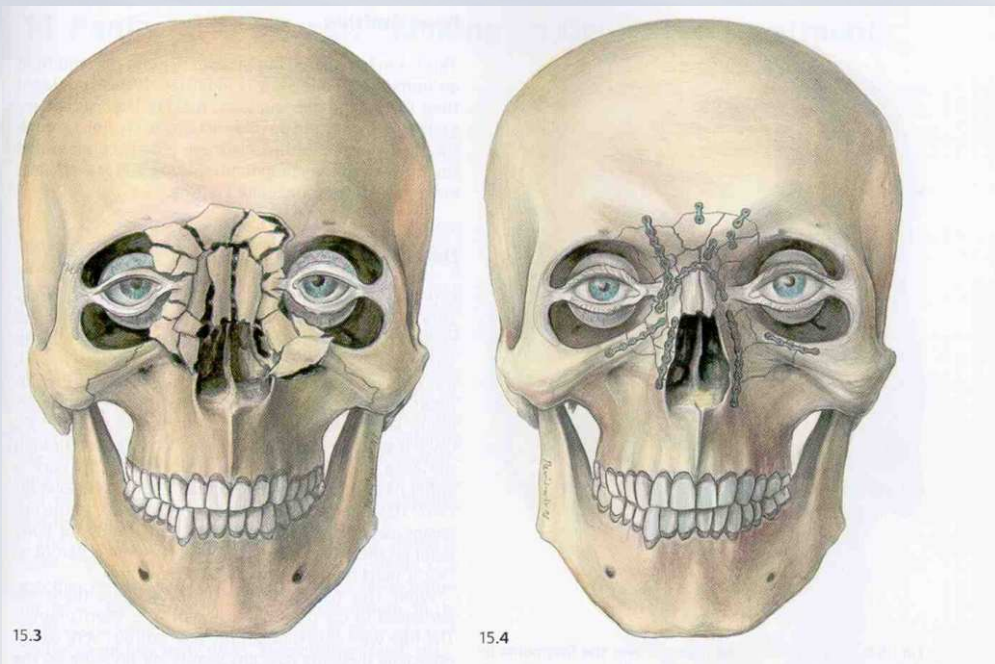
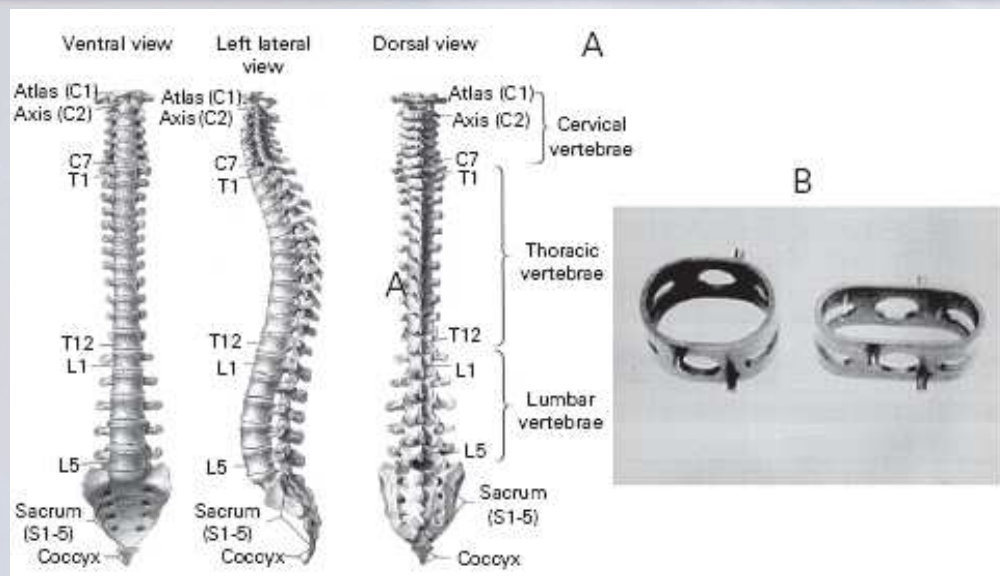


Біоімпланти та біопротези

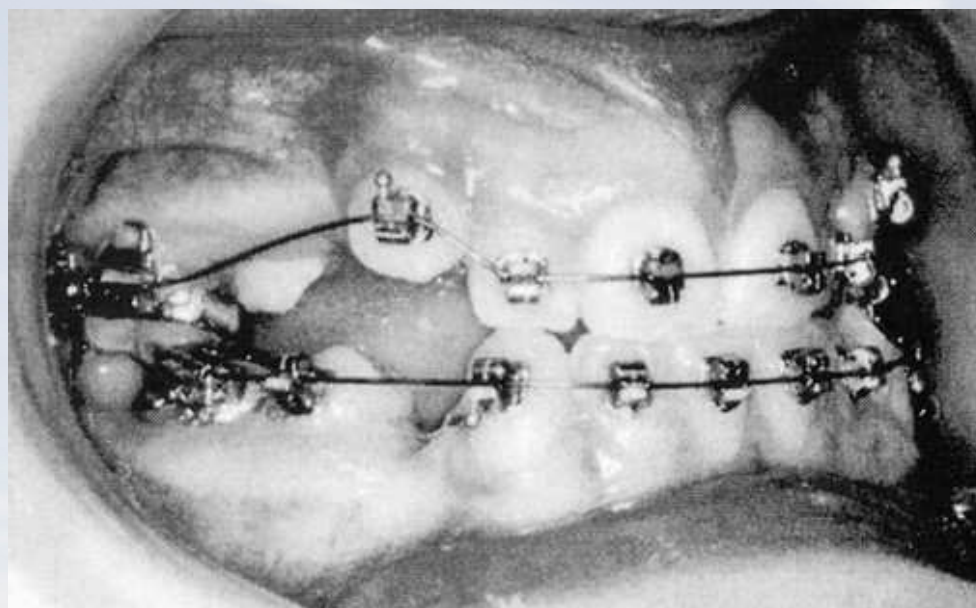


Сталість навантаження протягом тривалого часу стимулює зростання кісток та утримання їх в підвантаженому положенні

Для костоправів

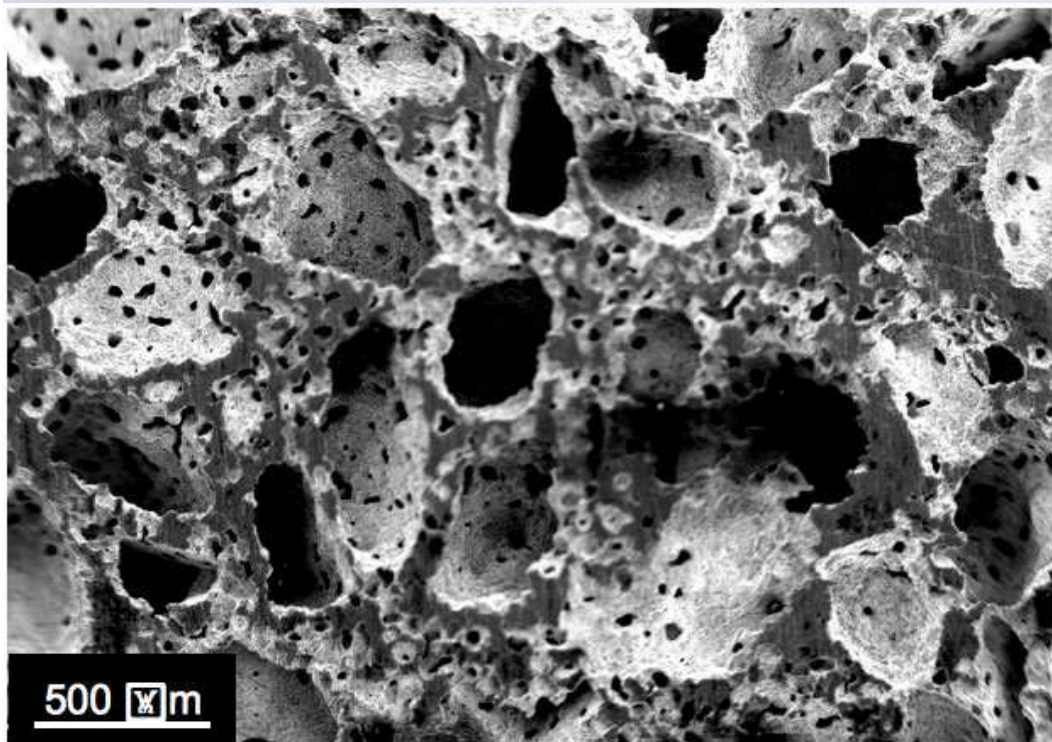


Для зубодерів

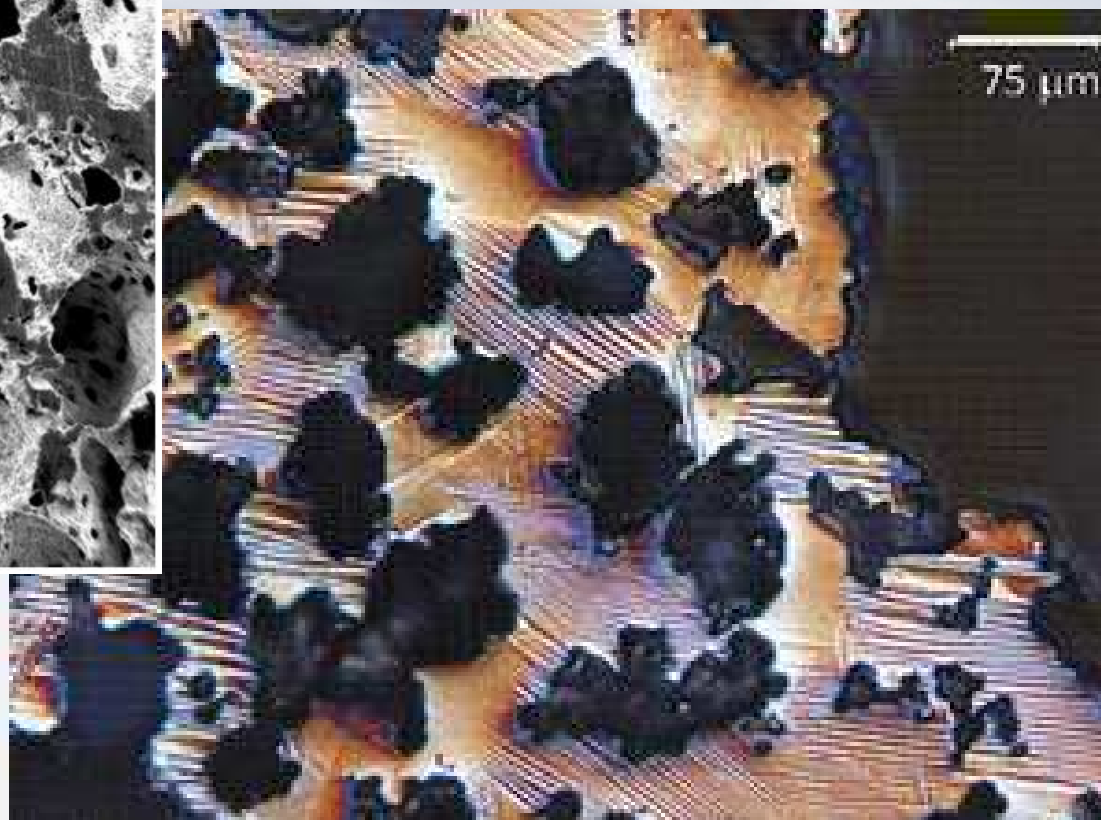


Нові матеріали - піни

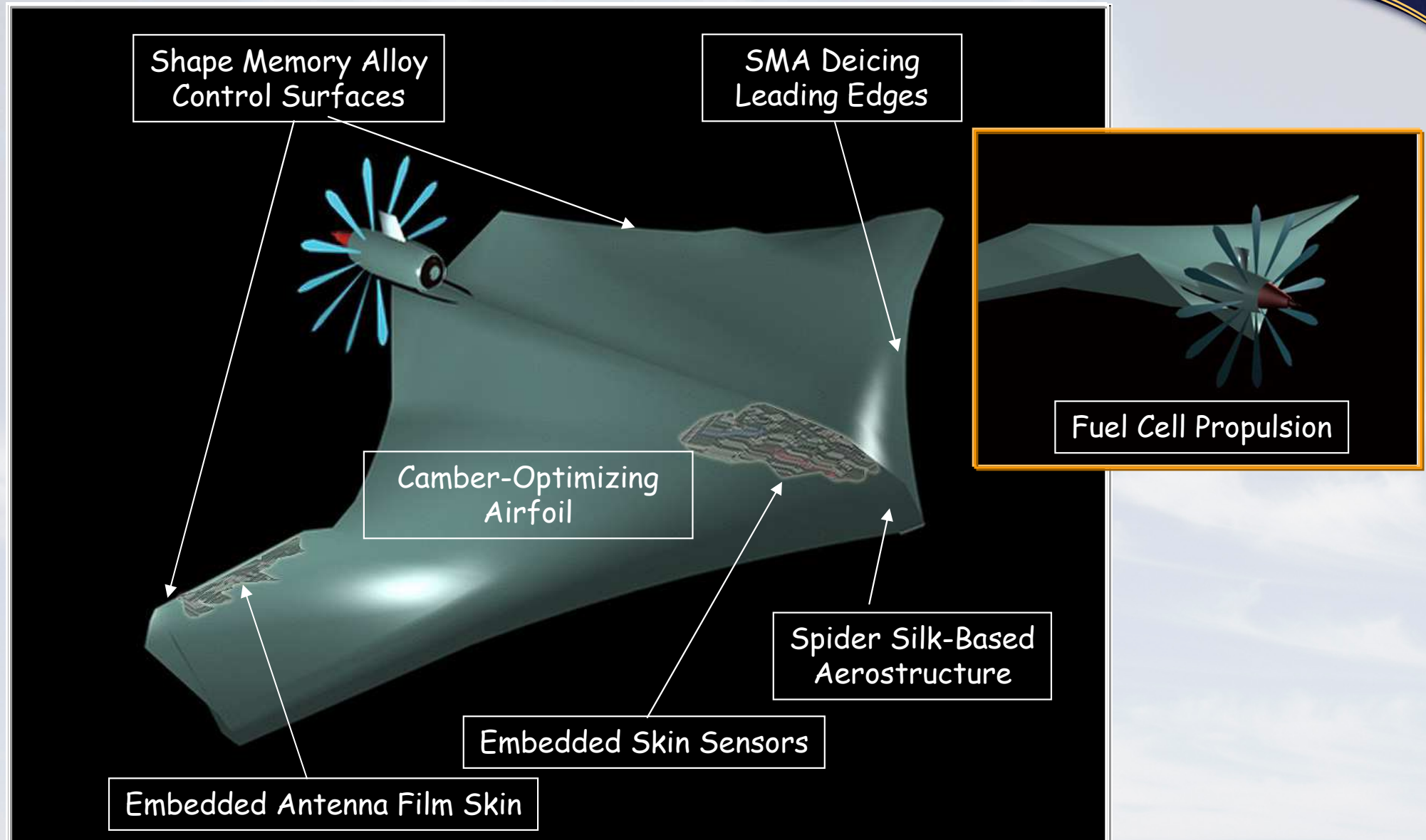
Ni-Mn-Ga




Мартенситні кристали в піні



The Smart UA of 2025

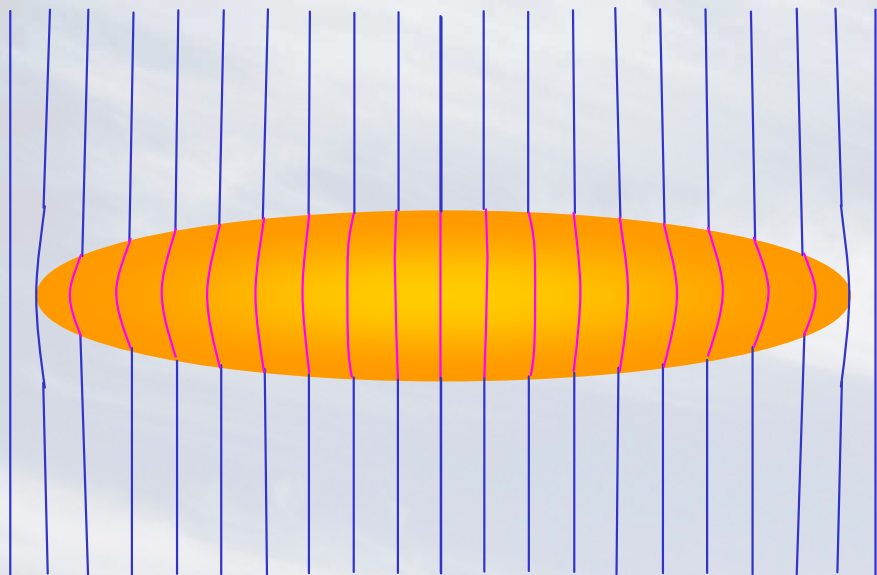


The background of the slide is a photograph of a clear blue sky filled with soft, white, wispy clouds. The clouds are scattered across the frame, with some appearing more dense than others. The overall tone is bright and airy.

Дякую за увагу!
Thank you for your attention!
Merci beaucoup!

Когерентне спряження

Когерентна границя



Нарівкогерентна границя

