

PHẦN II

TÍNH CHẤT CỦA VẬT LIỆU

CHƯƠNG 10

TÍNH CHẤT CƠ

10.1 Giới thiệu

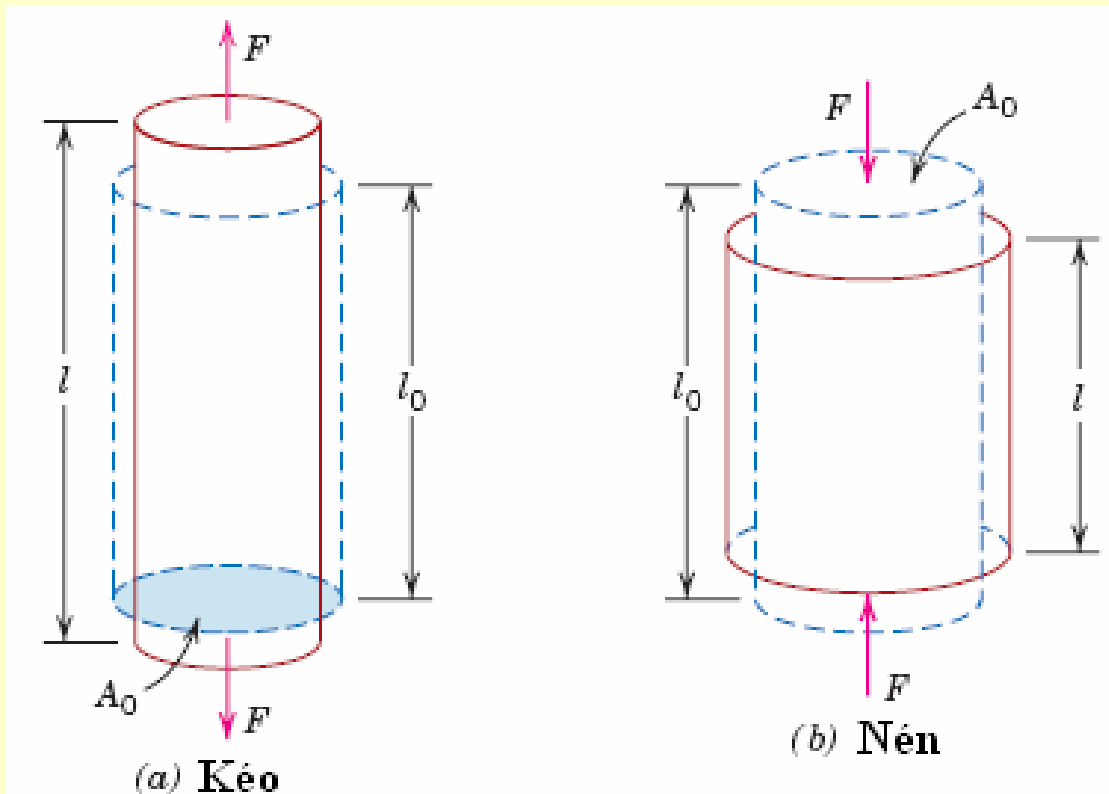
- Tính chất cơ là các đặc tính của vật liệu biểu hiện ra khi tác dụng cơ học lên nó.
- Để xác định tính chất cơ thường phải phá hủy mẫu và tính chất cơ xác định được sẽ không phụ thuộc vào dạng hình học và kích thước mẫu.
- Sự phát triển công nghệ mới thường đi sau sự tiến bộ của khoa học vật liệu.

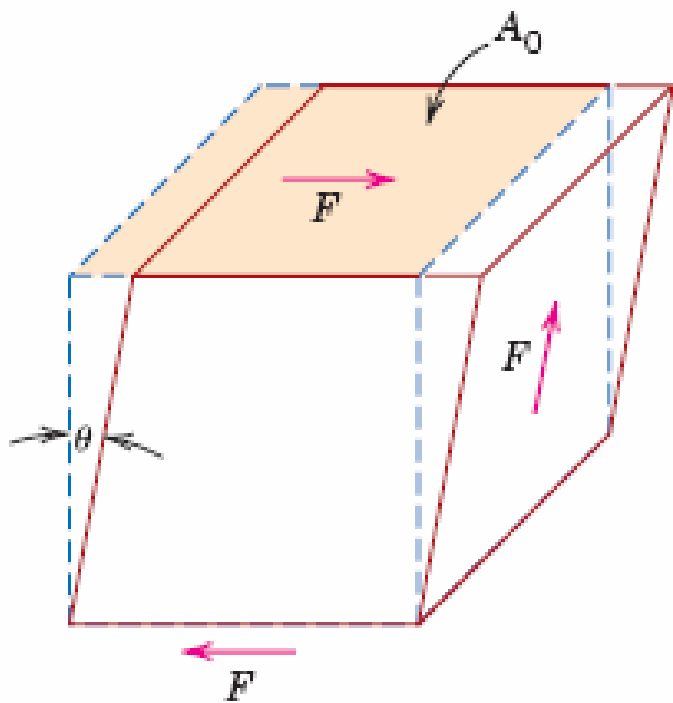
Ví dụ: Hiệu suất chuyển hóa năng lượng nhiệt $\rightarrow$ năng lượng cơ $\rightarrow$ năng lượng điện của turbin khí $\rightarrow$ liên quan trực tiếp với độ bền ở nhiệt độ cao của vật liệu làm turbin. Từ 1950 – 1960 người ta đã dùng hợp kim Ni có nhiệt độ vận hành đến 1200 °C (so với thép, nhiệt độ làm việc cho phép chỉ khoảng 550 °C). Gần đây với vật liệu gốm, nhiệt độ có thể tăng đến 3000 °C nhưng cần phải giải quyết được tính giòn của gốm.

Ví dụ: Từ lâu máy bay được chế tạo từ hợp kim Al, gần đây $\rightarrow$ sử dụng composit hoặc polyme có cấu trúc định hướng $\rightarrow$ tỉ số độ bền / khối lượng cao hơn $\rightarrow$ chế tạo máy bay nhẹ hơn $\rightarrow$ chuyên chở hành khách, hàng hóa, nhiên liệu nhiều hơn $\rightarrow$ bay lâu hơn mà không cần dừng lại. Dựa trên loại vật liệu mới này, người ta đã thực hiện thành công chuyến bay từ California đến Japan chỉ trong 13 giờ. 3

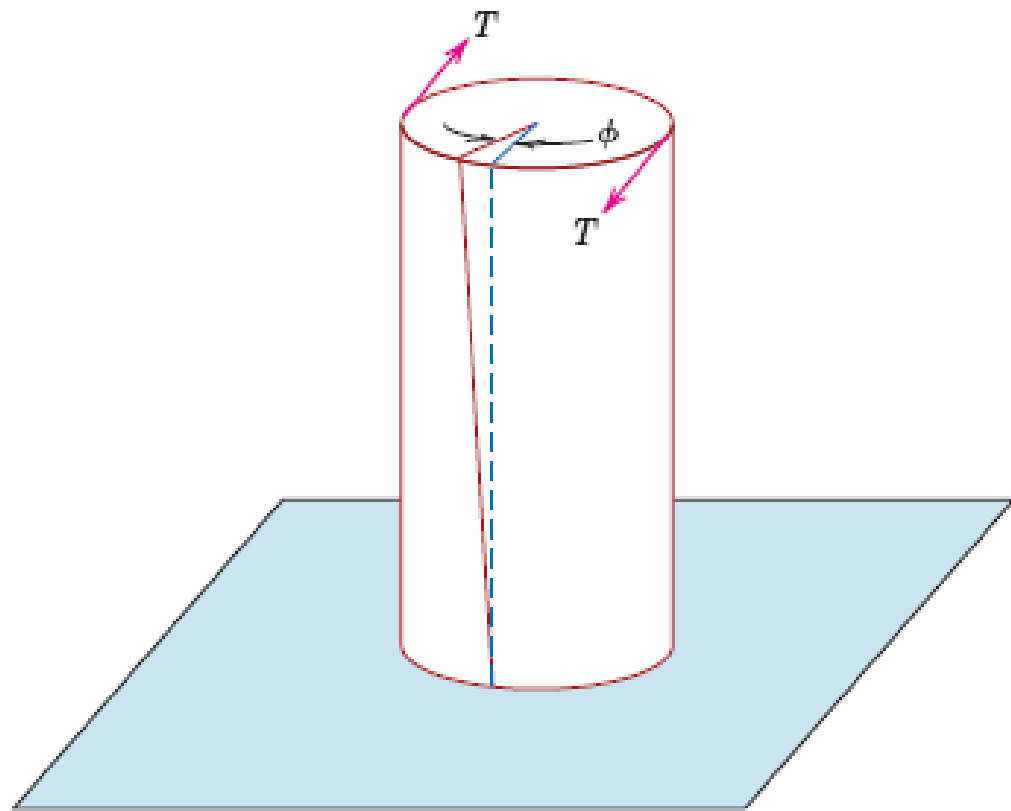
10.2 Biến dạng và đứt của vật liệu kỹ thuật

- Biến dạng (Deformation) là sự thay đổi kích thước của vật liệu dưới tác dụng lực.
- ✓ Biến dạng đàn hồi (elastic deformation),
- ✓ Biến dạng dẻo (plastic deformation).
- Đứt (fracture) khi vật liệu chịu lực lớn phân thành hai hoặc nhiều mảnh nhỏ.
- Phá hủy (failure) khi chi tiết không thực hiện được chức năng của mình, trong nhiều trường hợp, phá hủy có thể xảy ra trước khi đứt gãy.





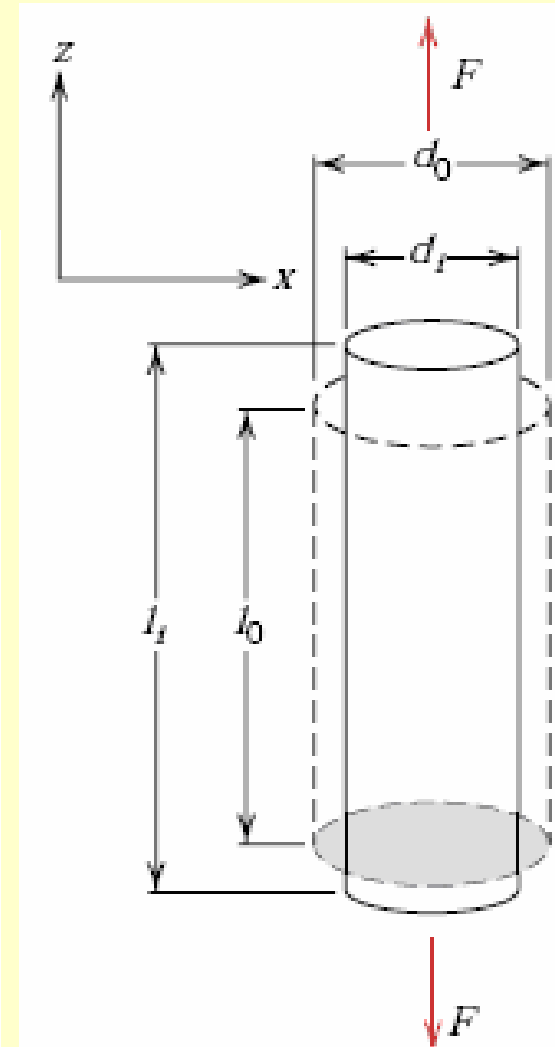
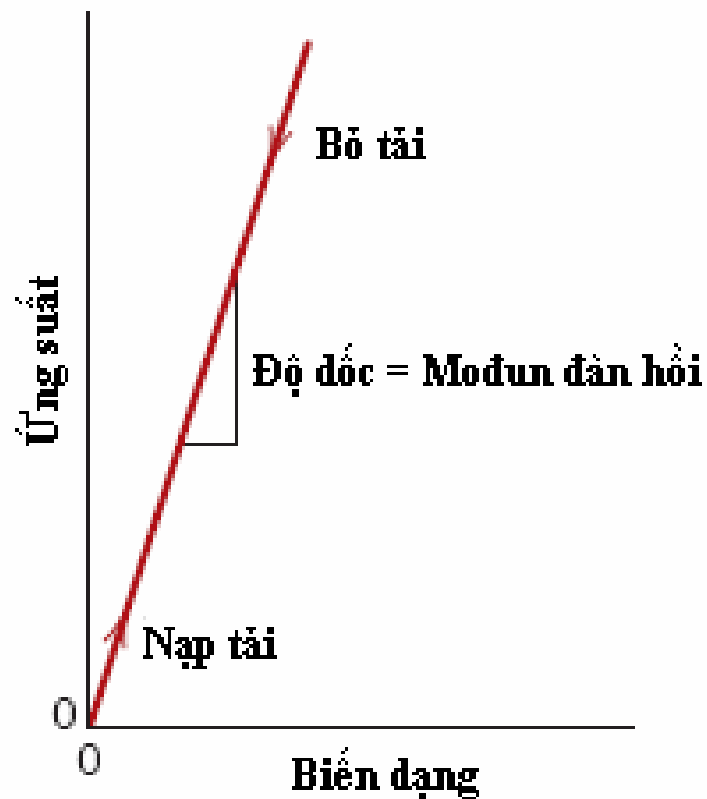
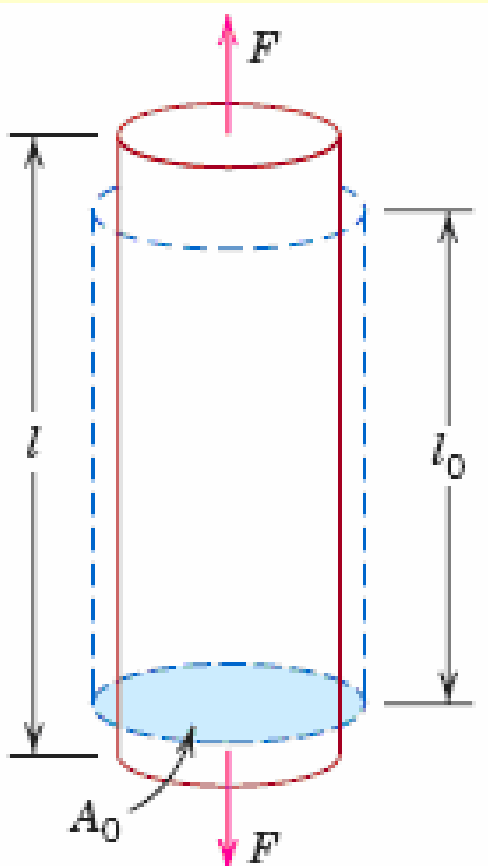
(c) Trượt



(d) Xoắn

10.2.1 Biến dạng đàn hồi

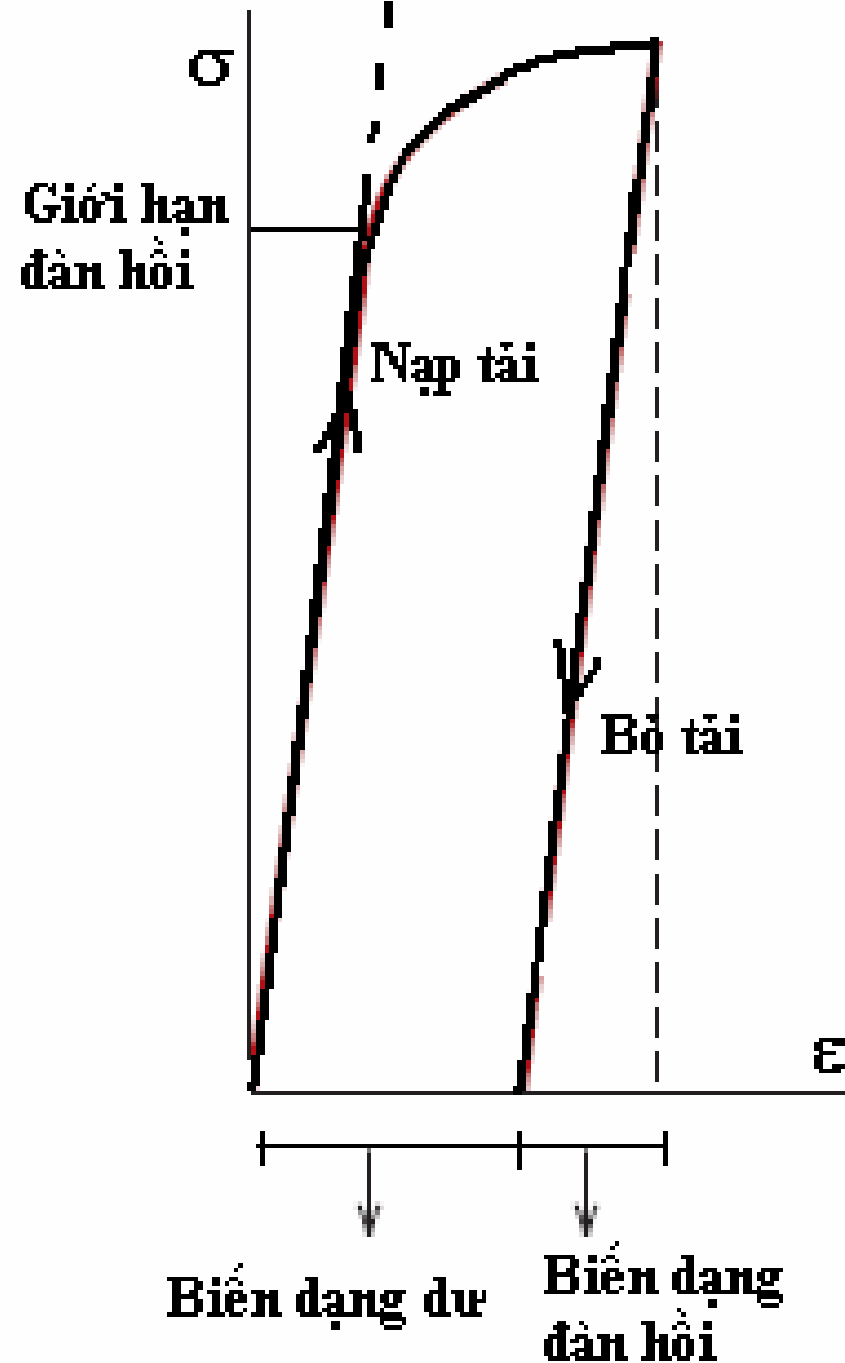
- Ứng suất danh nghĩa, Biến dạng danh nghĩa, định luật Hook, môđun E
- Hệ số Poisson, E và nhiệt độ
- Quan hệ ΔV và ν

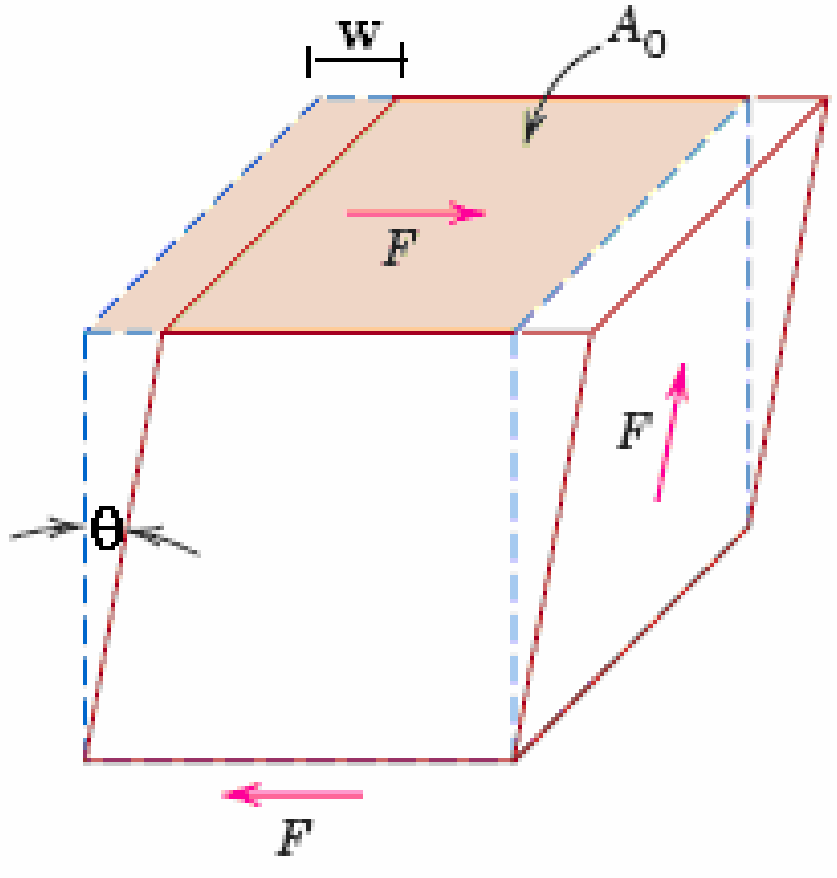


10.2.2 Biến dạng dẻo

10.2.2.1 Giới thiệu

- Khi $\sigma > \sigma_{ch} \rightarrow$ biến dạng dẻo $\rightarrow$ bỏ tải không về hình dạng, kích thước ban đầu.
- Trong đa số vật liệu, biến dạng đàn hồi $\rightarrow$ sự kéo dài liên kết.
- Trong tinh thể, biến dạng dẻo $\rightarrow$ sự dịch chuyển lệch (khuyết tật đường)
- Độ dốc của đường $\sigma - \epsilon$ trong vùng biến dạng dẻo giảm với sự tăng biến dạng, tuy nhiên muốn tiếp tục biến dạng dẻo thì phải tăng ứng suất
 - $\rightarrow$ vật liệu bị hóa cứng bởi sự tương tác giữa các lệch trong cấu trúc tinh thể
 - $\rightarrow$ giảm độ dịch chuyển của lệch hoặc làm lệch ngừng di chuyển hoàn toàn





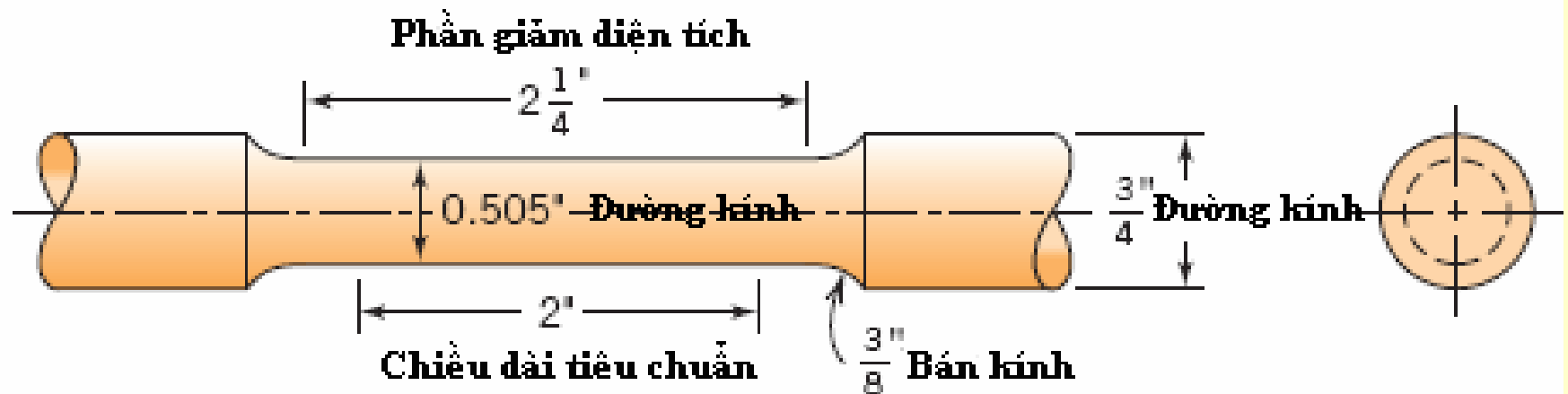
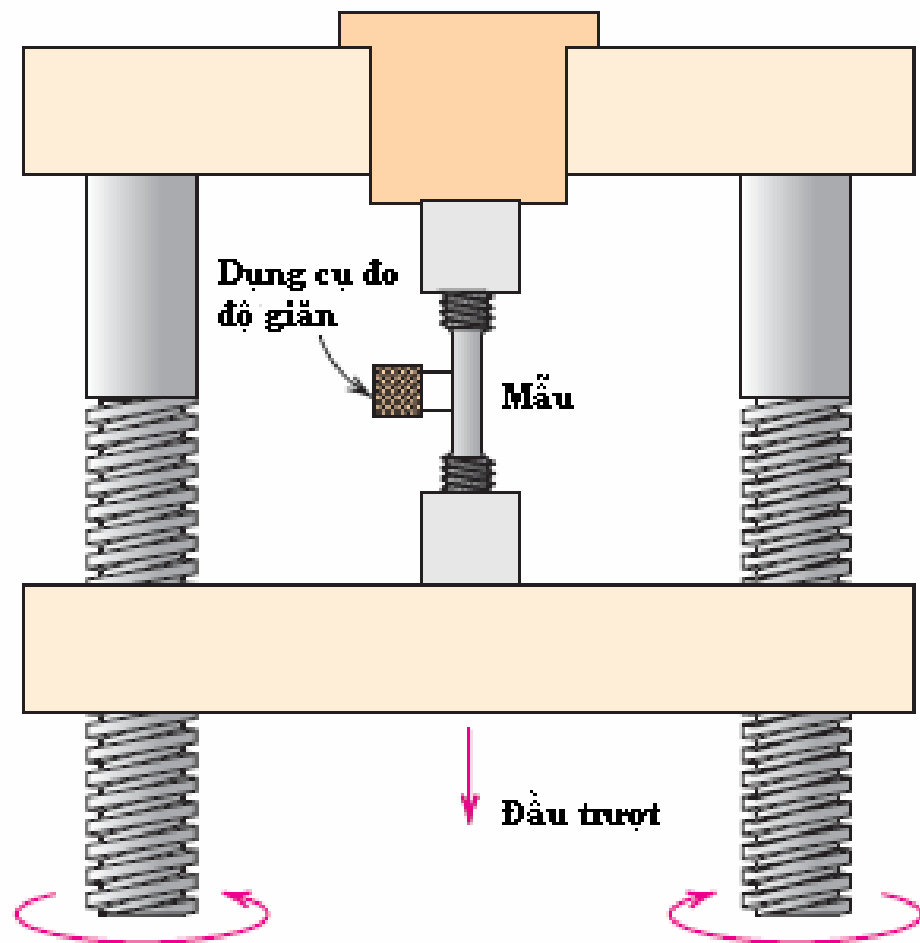
10.2.2.2 Ứng suất trượt:

- Ứng suất trượt, Độ biến dạng trượt, Quan hệ
- Đối với vật liệu đẳng hướng: $E = 2G(1 + \nu)$
- Khi $\tau > \tau_{\text{crit}}$ thì trượt xảy ra, vật liệu bắt đầu bị biến dạng dẻo.
- Biến dạng dẻo là không đẳng hướng: nó chỉ xảy ra trên các mặt và phương xếp chặt

Hệ	Mặt trượt	Phương trượt
Fcc	{111}	$\langle 110 \rangle$
Bcc	{110} {211} {321}	$\langle 111 \rangle$
Hcp	{0001}	Phương a_1, a_2, a_3

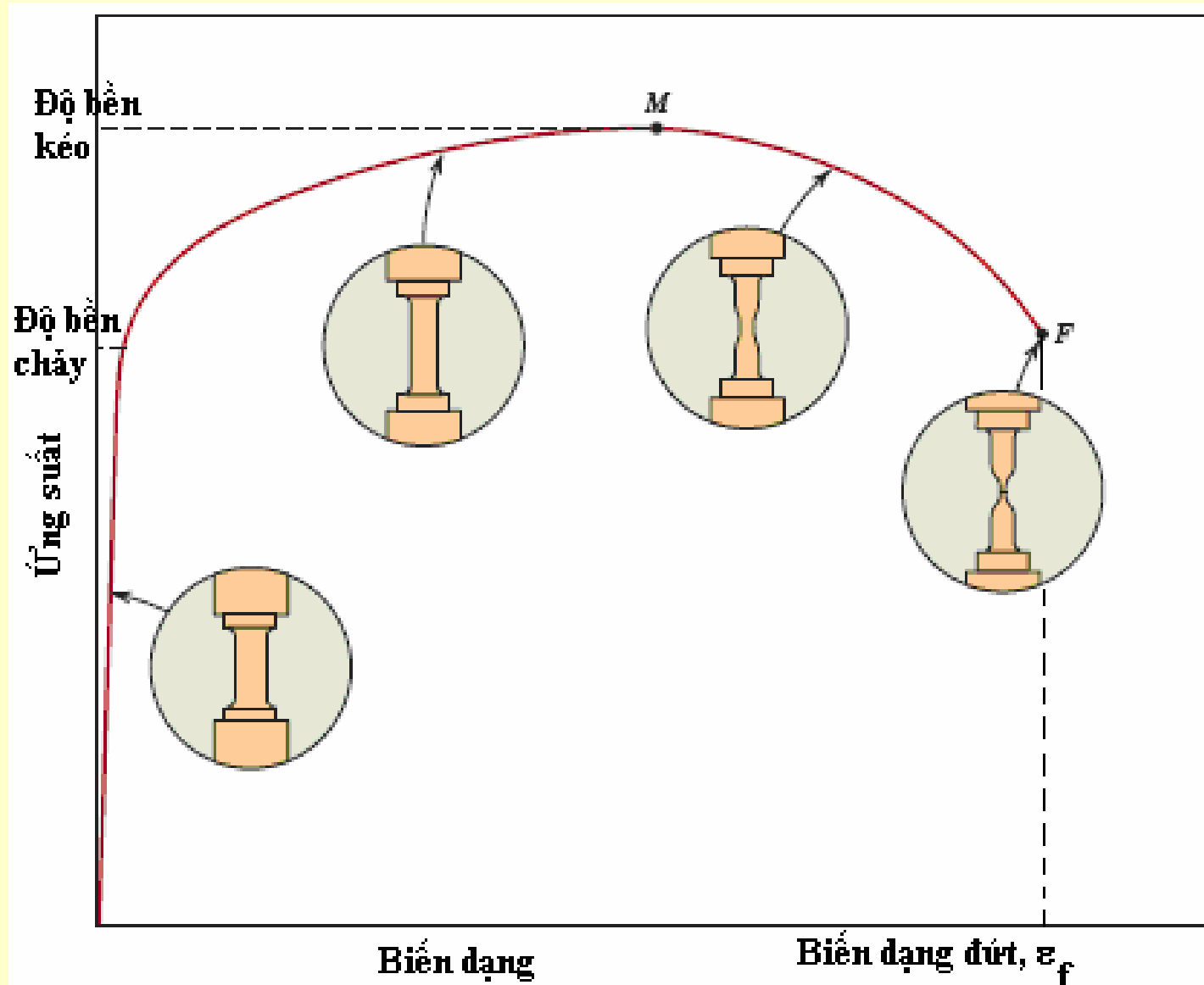
10.2.3 Phép thử kéo (Tensile Test)

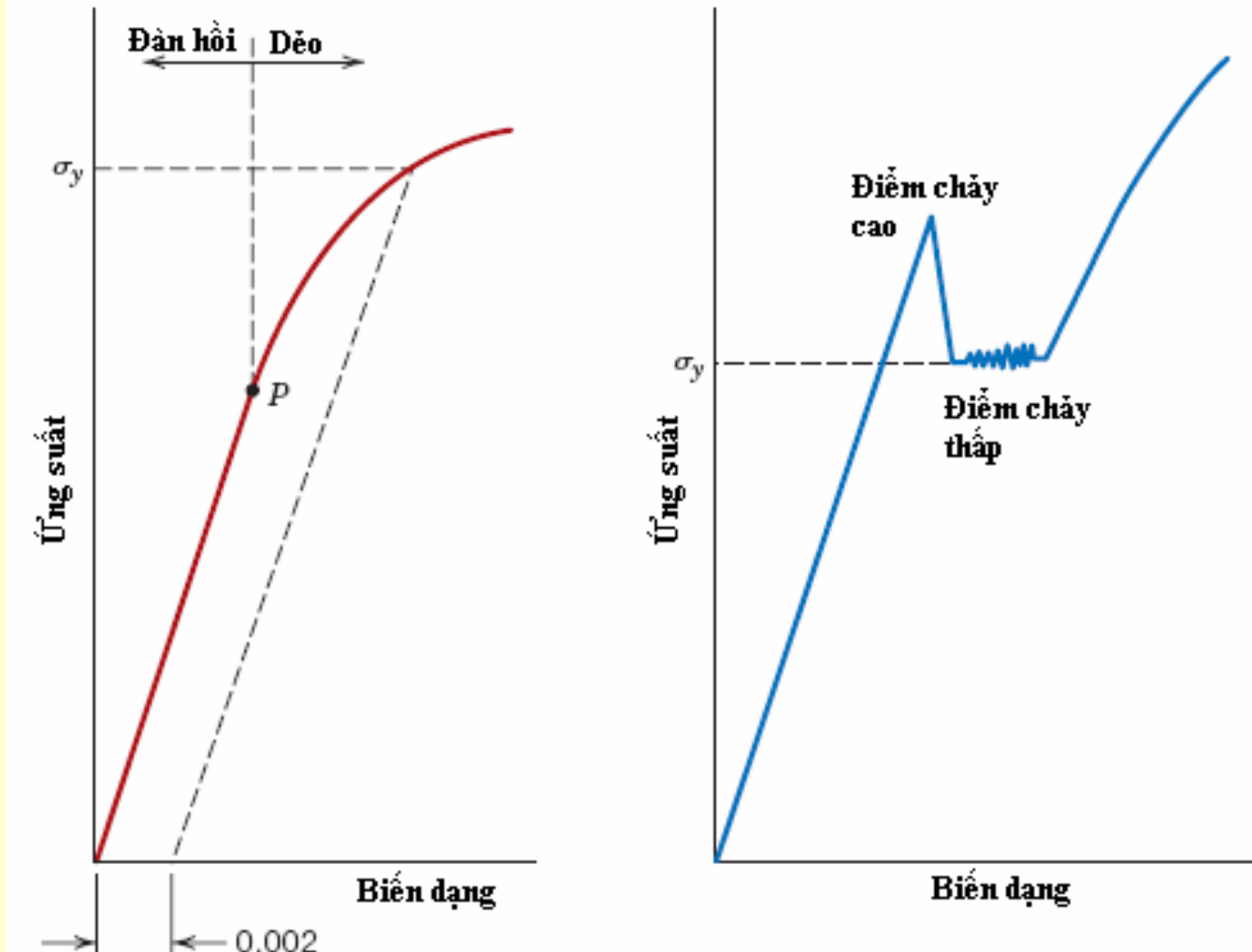
10.2.3.1 Thử kim loại



Các thông số thu được:

- độ bền chảy, độ bền kéo, Biến dạng đứt, % RA,
- diện tích dưới đường cong = công/1 dvtt





• Ứng suất thực, Biến dạng thực, Quan hệ thực – danh nghĩa

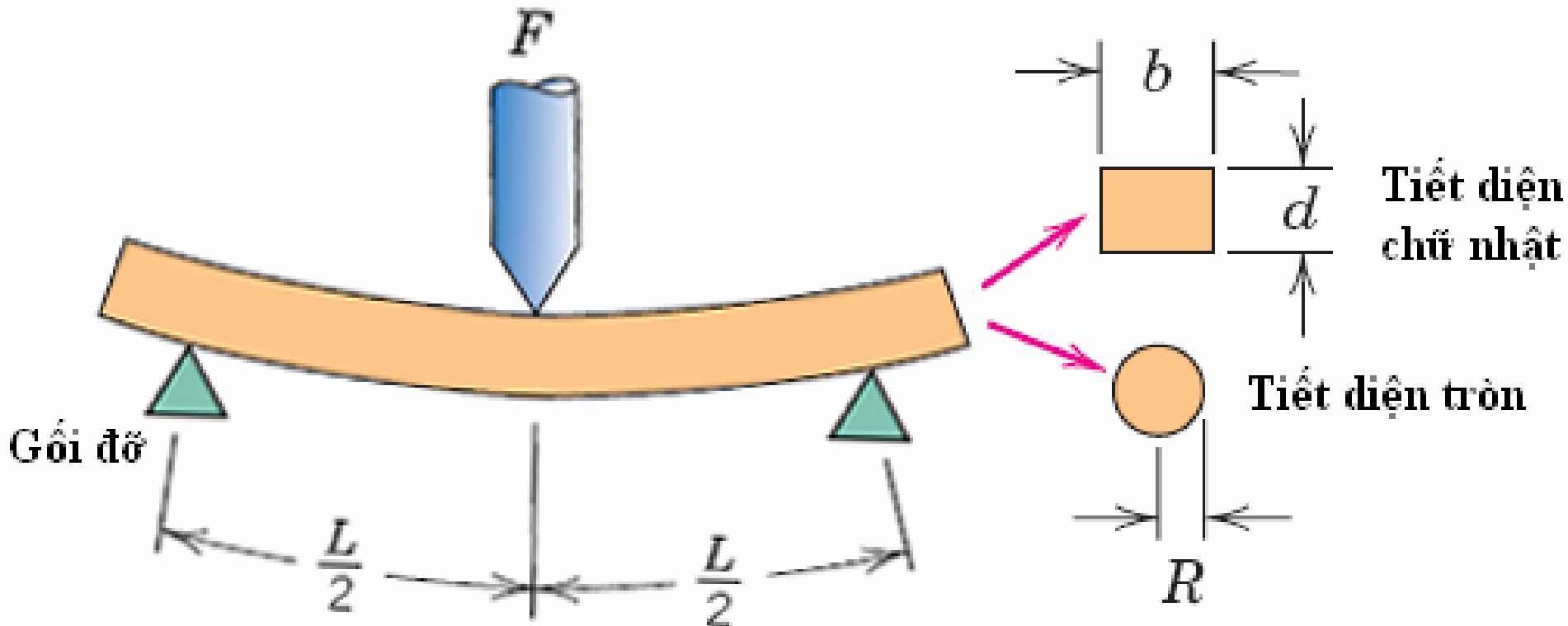
• khi biến dạng dẻo $V = \text{const} \Rightarrow A_0 l_0 = A l \Rightarrow \frac{l}{l_0} = \frac{A_0}{A}$

$$\varepsilon_{th} = \ln(l/l_0) = \ln(1 + \varepsilon)$$

$$\sigma_{th} = \sigma(1 + \varepsilon)$$

10.2.3.2 Thử gôm

- Do gôm giòn → khó chế tạo mẫu có hình dáng cần thiết (khu vực có tiết diện nhỏ) và khó chế tạo bộ gá kẹp mẫu → thử gôm bằng phương pháp uốn cong



Thuận lợi:

- **Dạng hình học của mẫu đơn giản (khối chữ nhật hoặc khối trụ)**
- **Quá trình thử đơn giản.**
- **Chi phí thử thấp.**

Ứng suất uốn $\sigma = Mc / I$

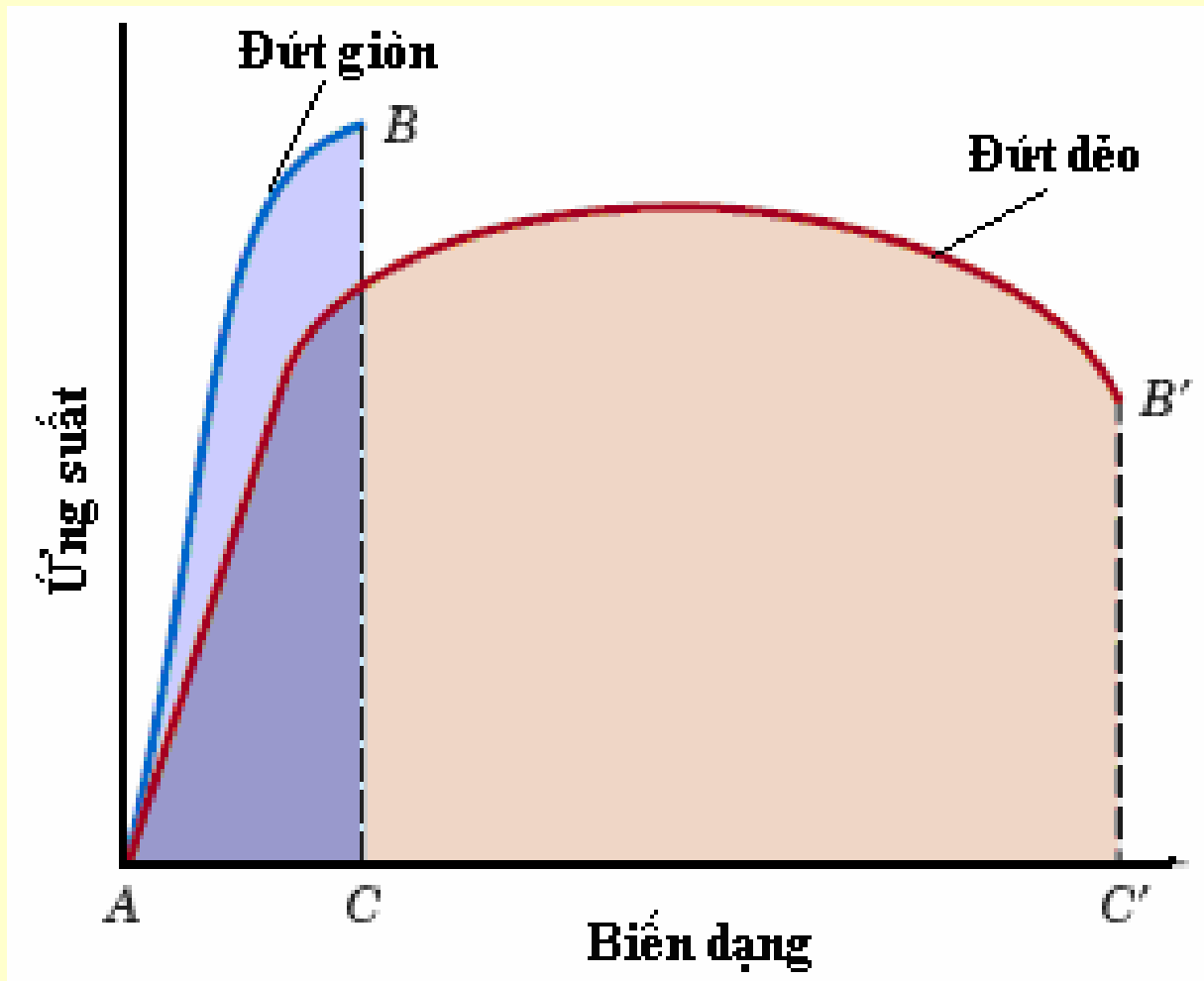
M: moment uốn cực đại. c: khoảng cách từ tâm đến bề mặt mẫu.

I: moment quán tính của mặt cắt ngang, F: tải; L: khoảng cách giữa hai gối đỡ.

Tiết diện mẫu	M	c	I	σ
Chữ nhật	$FL/4$	$d/2$	$bd^3/12$	$3FL/2bd^2$
Tròn	$FL/4$	R	$\pi R^4/4$	$FL/\pi R^3$

10.2.4 Đứt dẻo và đứt giòn: (Ductile and Brittle Fracture)

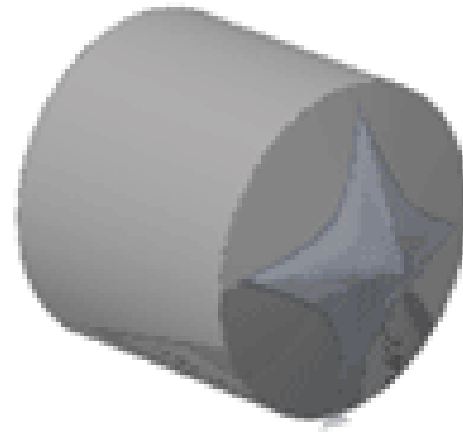
Nếu quá trình biến dạng cứ tiếp tục thì đứt tất yếu sẽ xảy ra. Vật liệu có độ biến dạng dẻo lớn trước khi đứt là vật liệu dẻo, ngược lại là vật liệu giòn.

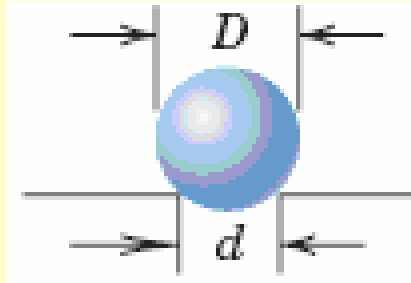
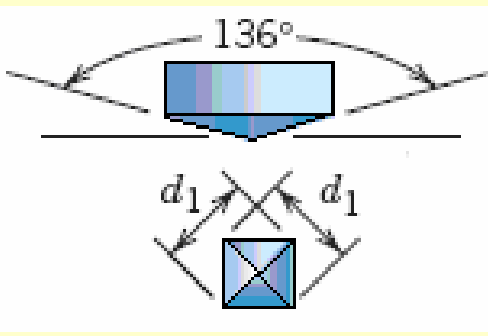
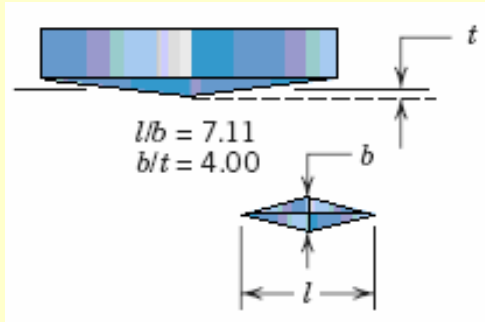


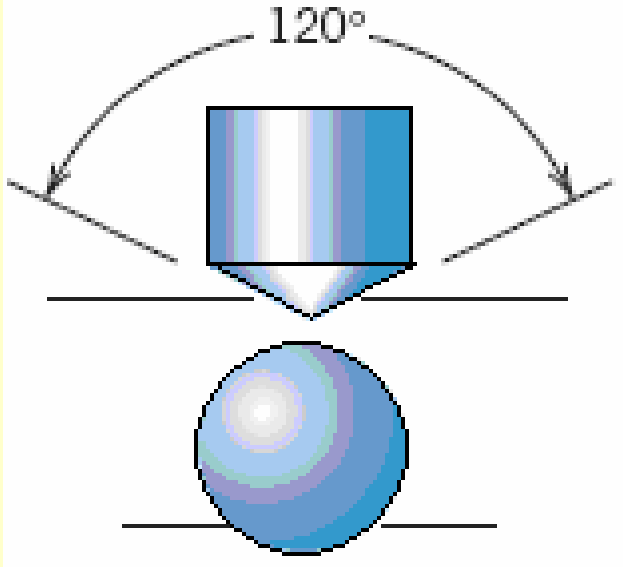
10.2.5 Phép đo độ cứng

- Độ cứng là cách đo độ bền của vật liệu chống lại biến dạng dẻo (vết lõm, xước).
- Nguyên tắc đo: Áp đặt một tải trọng lên đầu đâm (indenter), đầu này sẽ tạo vết lõm trên bề mặt mẫu, xác định độ sâu và kích thước vết lõm sẽ tính được độ cứng.
- Có nhiều cách đo độ cứng (phụ thuộc vào loại đầu đâm) như Brinell, Vickers, Knoop, Rockwell và Rockwell ở bề mặt (superficial Rockwell).
- Trong phép đo độ cứng Rockwell, chỉ số độ cứng là hiệu độ sâu của hai vết lõm tạo ra từ một tải nhỏ ban đầu và một tải lớn hơn tiếp theo.
- Đối với phép đo Rockwell, tải nhỏ ban đầu là 10 kg, tải lớn tiếp theo có thể là 60, 100 và 150 kg. Mỗi thang tương ứng với một chữ số phụ thuộc vào đầu đâm và tải trọng.
- Đối với phép đo Rockwell bề mặt, tải nhỏ ban đầu là 3 kg, tải lớn tiếp theo có thể là 15, 30 và 45 kg..
- Trong mỗi thang, độ cứng nằm trong khoảng 0 – 130.
- Nếu độ cứng > 100 hoặc < 30 trên bất kỳ thang nào sẽ không chính xác, nên phải dùng thang cứng hơn hoặc mềm hơn tiếp theo.





Phép đo độ cứng	Đầu đâm	Hình dạng đầu đâm	Tải trọng	Công thức tính độ cứng
Brinell (HB hoặc BHN)	Bi có đường kính 10 mm bằng thép hoặc WC (cacbua wonfram)		P	$HB = \frac{2P}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}$
Tế vi Vickers (HV)	Hình chóp bằng kim cương		P	$HV = 1,854P/d_1^2$
Tế vi Knoop (HK)	Hình chóp bằng kim cương		P	$HK = 14,2P/l^2$

Rockwell và Rockwell bề mặt (HR)	Hình côn bằng kim cương hoặc bi thép có đường kính 1/16; 1/8; 1/4; 1/2 in.		Rockwell: nhỏ 10 kg, lớn: 60; 100; 150 kg. Rockwell bề mặt: nhỏ 3kg. lớn: 13; 30; 45 kg
---	---	---	--

Tham khảo thêm các tiêu chuẩn ASTM về phép đo độ cứng như (có trên web của e-learning.hcmut.edu.vn)

- **E18–98, Standard Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials.**
- **E10–00, Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials.**
- **E92–82, Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials.**
- **E384–99, Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials.**
- **E140–97, Standard Hardness Conversion Tables for Metals.**

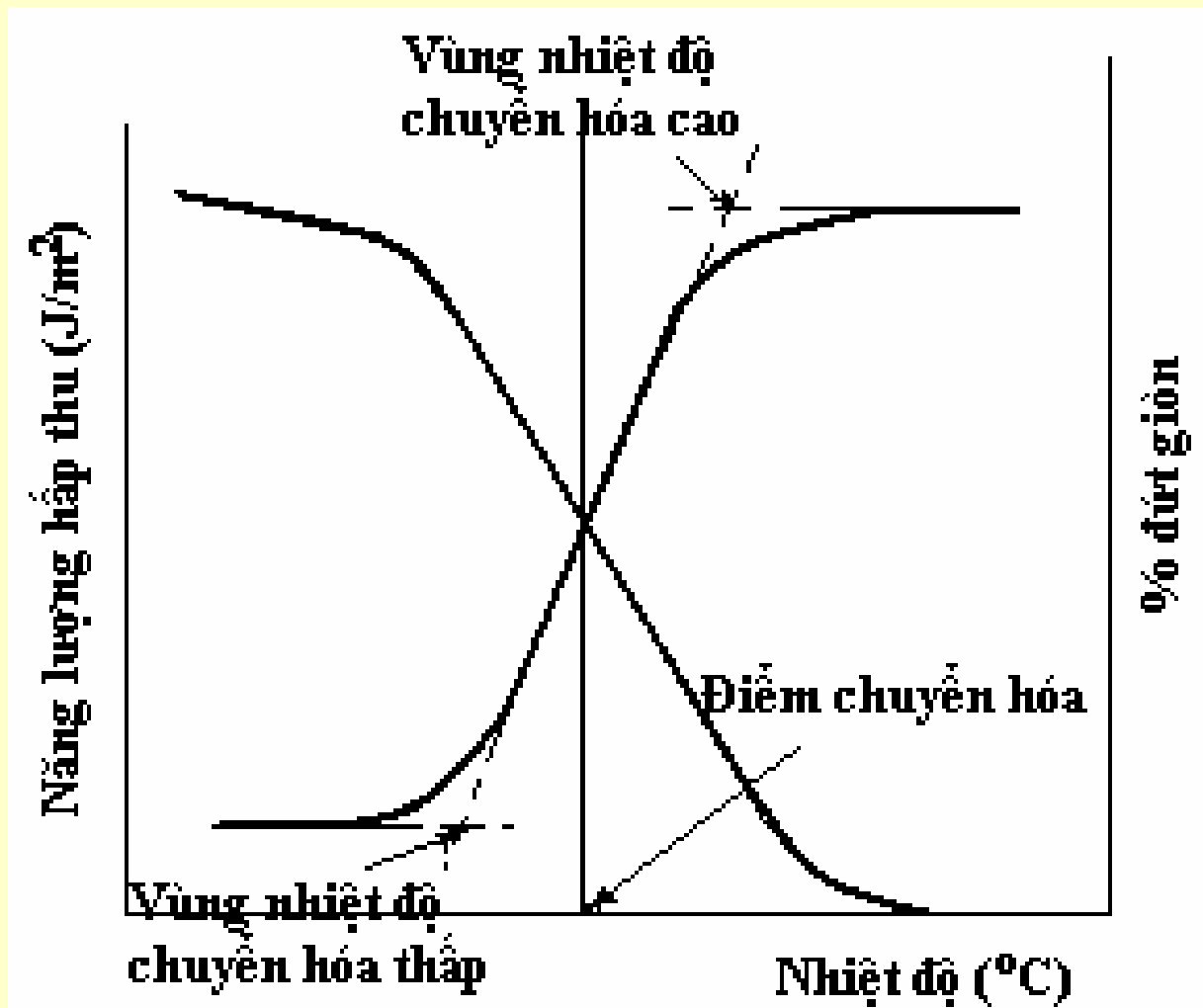
Thang đo Rockwell		
Ký hiệu	Đầu đâm	Tải trọng
A	Kim cương	60
B	Bi, 1/16 in	100
C	Kim cương	150
D	Kim cương	100
E	Bi, 1/8 in	100
F	Bi, 1/16 in	60
G	Bi, 1/16 in	150
H	Bi, 1/8 in	60
K	Bi, 1/8 in	150

Thang đo Rockwell bề mặt		
Ký hiệu	Đầu đâm	Tải trọng
15N	Kim cương	15
30N	Kim cương	30
45N	Kim cương	45
15T	Bi, 1/16 in	15
30T	Bi, 1/16 in	30
45T	Bi, 1/16 in	45
15W	Bi, 1/8 in	15
30W	Bi, 1/8 in	30
45W	Bi, 1/8 in	45

Ví dụ: 80 HRB biểu thị độ cứng Rockwell là 80 trên thang B; 60 HR30W biểu thị độ cứng Rockwell bề mặt là 60 trên thang 30W.

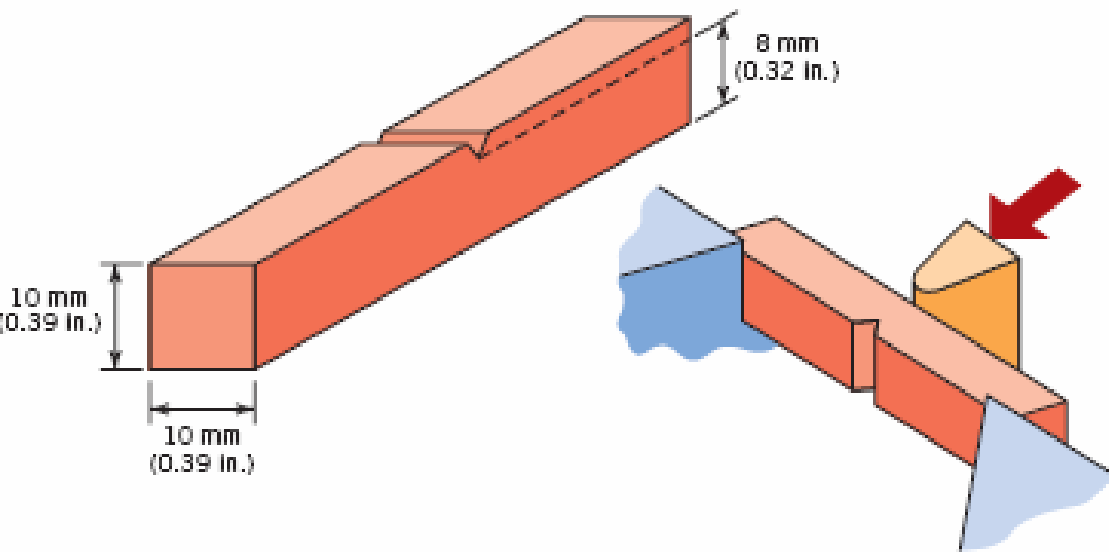
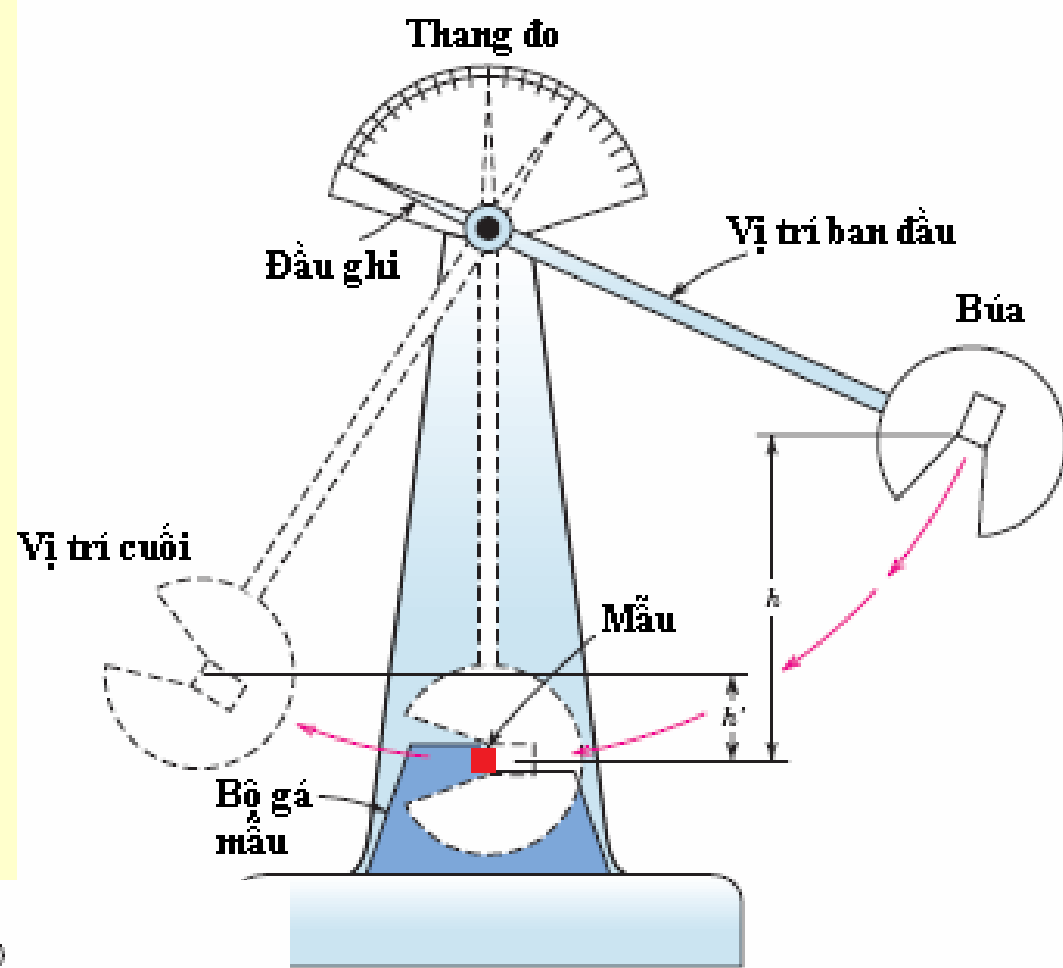
10.2.6 Phép thử va đập theo Charpy

- Các kim loại như thép ferit (Bcc) thể hiện sự thay đổi lớn về năng lượng hấp thụ khi đứt trong một khoảng nhiệt độ nhất định → sự chuyển hóa từ dẻo sang giòn.
- Đối với kim loại Bcc → đứt dẻo ở nhiệt độ cao và đứt giòn ở nhiệt độ thấp.

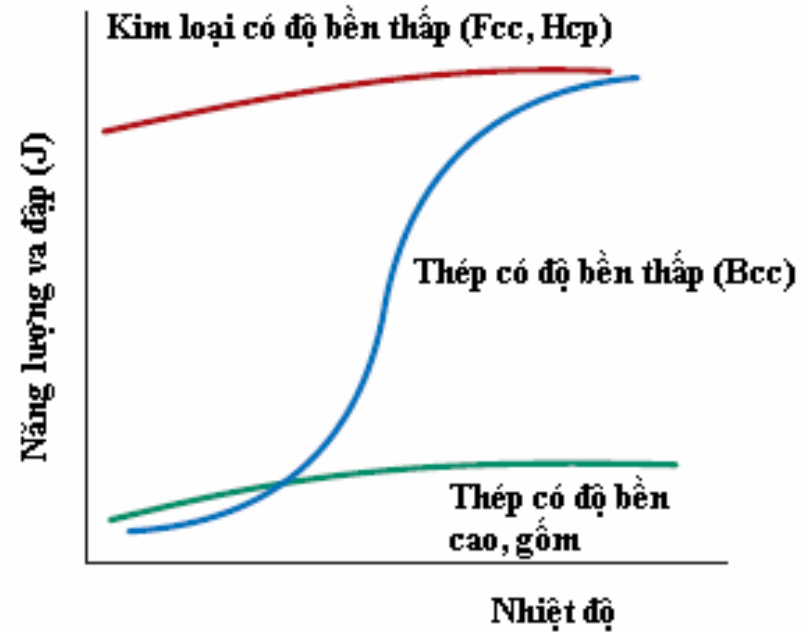
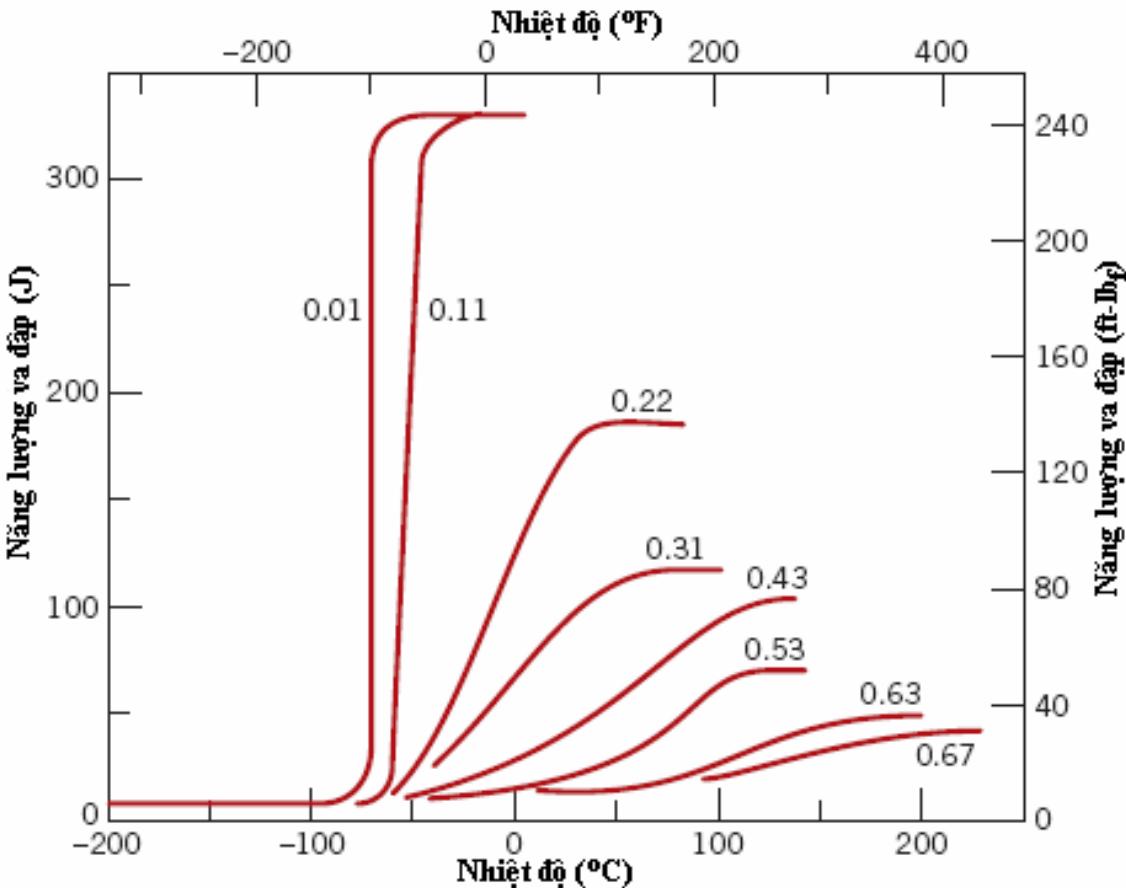


- Khoảng nhiệt độ chuyển hóa này phụ thuộc thành phần hóa học và cấu trúc vi mô của kim loại.
- Sự chuyển hóa này ít gặp đối với gốm tinh thể, polyme tinh thể, composit hoặc kim loại Fcc
- Vùng ở giữa là vùng chuyển hóa. Nhiệt độ tại đó có 50% giòn, 50% dẻo gọi là nhiệt độ chuyển hóa từ dẻo sang giòn → cần phải lưu ý khi thiết kế các chi tiết làm việc ở nhiệt độ thấp.
- Ví dụ: Mùa đông 1988 – 1989 ở Alaska rất lạnh, dẫn đến một sự tăng bất thường số trục xe hơi bị gãy. Vì vậy, vùng làm việc của vật liệu phải ở vùng có nhiệt độ chuyển hóa cao (đứt dẻo).
- Trong phép thử kéo, tốc độ tăng tải chậm hơn nhiều so với khi sử dụng và không có các vết nứt trên bề mặt.
- Trong thực tế, tải thường ở dạng va đập (tốc độ tăng tải nhanh) và đa số kết cấu đều chứa các vết nứt.
- Hai yếu tố này làm giảm độ dẻo và dẫn đến đặc tính giòn hơn khi dùng phép thử kéo → phép thử kéo không còn phù hợp trong trường hợp này → Phép thử va đập của Charpy (đơn giản, rẻ tiền) → sử dụng rộng rãi để đánh giá tính giòn

• Nguyên lý: Một phần thể năng của con lắc ở vị trí ban đầu sẽ bị mẫu hấp thu trong quá trình đứt. Sai biệt $h - h'$ sẽ cho biết năng lượng đứt của mẫu.



–Để xác định điểm chuyển hóa từ dẻo sang giòn người ta xác định năng lượng va đập trong một khoảng nhiệt độ rộng: mẫu được ngâm vào nitơ lỏng, nước đá khô để thu được số liệu ở nhiệt độ thấp hoặc gia nhiệt trong nước sôi, dầu để có số liệu ở nhiệt độ cao.

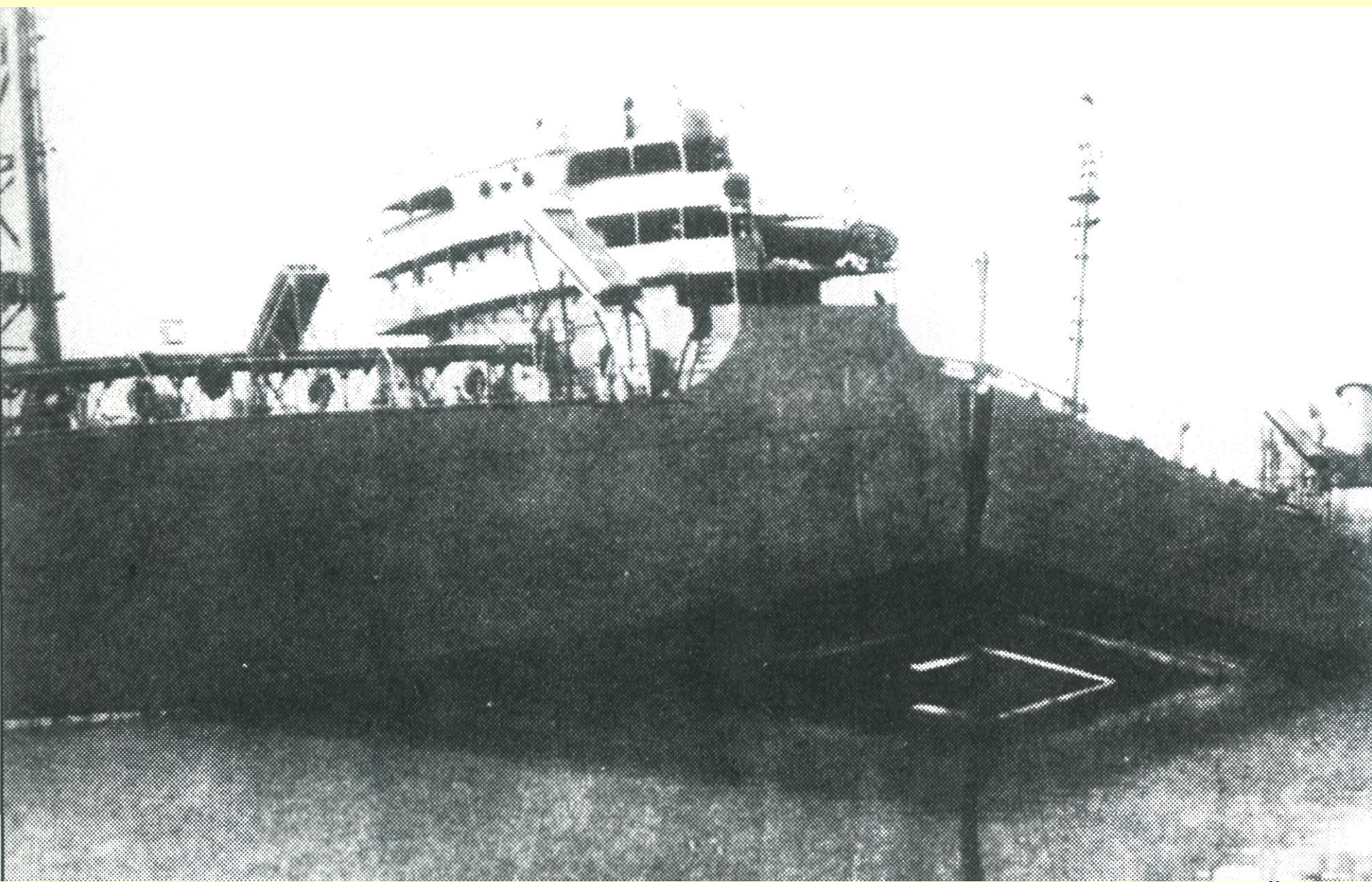


10.2.7 Đứt giòn

- Đứt giòn xảy ra thường đi kèm với một ít biến dạng dẻo và hấp thu tương đối ít năng lượng.
- Các vết đứt xảy ra nhanh chóng, ít khi có dấu hiệu báo trước và có thể xảy ra với tất cả loại vật liệu.
- Ưu điểm của phép thử va đập Charpy là đánh giá được độ bền giòn của vật liệu → chỉ cung cấp định tính, sự sắp xếp độ bền giòn của vật liệu, chứ không cung cấp các dữ liệu thiết kế mang tính định lượng.
- Ngoài ra, tải trọng trong phép thử va đập tuy gần với thực tế hơn phép thử kéo nhưng nó không cho biết tải cần thiết trong một áp dụng điển hình.

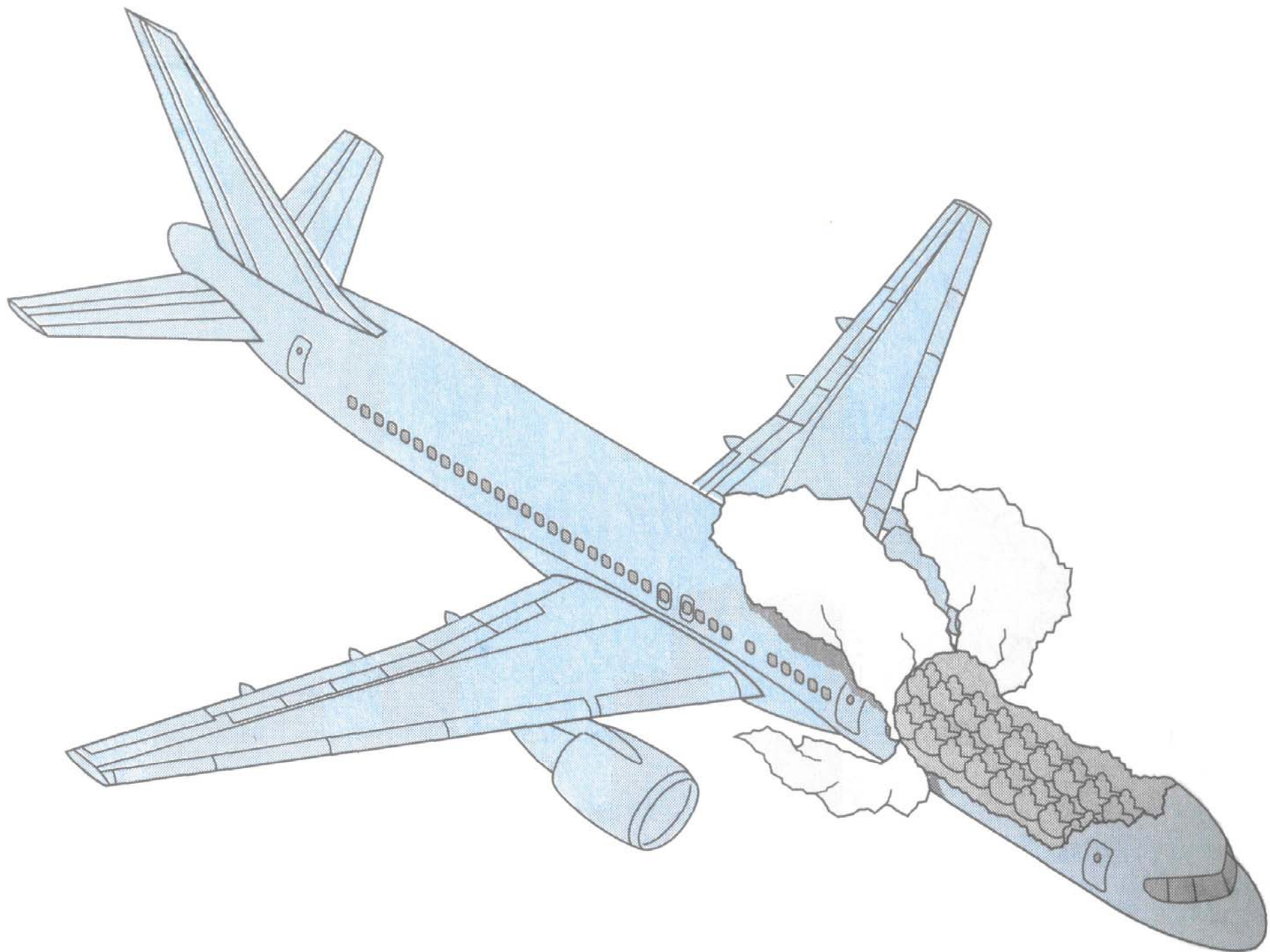
Ví dụ về đứt giòn

- Tàu USS Schenectady trong chiến tranh thế giới II bị đứt ra khi cập bến San Diego. Một trong các nguyên nhân là do đã dùng phương pháp hàn khi chế tạo thân tàu, về sau khi dùng rivet để nối thì loại tai nạn này giảm đáng kể.
- Một tàu chở dầu cũng bị đứt tương tự cũng do nguyên nhân dùng phương pháp hàn vỏ tàu.





- Vào những năm 1950, một số máy bay Comet đã nổ một cách bí ẩn khi đang bay. Điều tra cho thấy đó là do có ứng suất cao xung quanh cửa sổ, gây ra do thiết kế sai nên tạo các vết nứt.
- 1960 – 1970 loại máy bay chiến đấu F111 thường bị gãy ở phần cánh nối vào thân máy bay. Tai nạn có liên quan đến việc sử dụng thép có độ bền cao và quá trình xử lý nhiệt đã tạo ra vi cấu trúc không đồng nhất.
- Năm 1988 nóc của chiếc Boeing 737 của Hãng Hàng không Aloha (Mỹ) bị đứt mà không có dấu hiệu báo trước khi bay ngang qua biển Thái Bình Dương. Sự cố này có liên quan với việc ăn mòn vỏ máy bay bằng hợp kim nhôm.

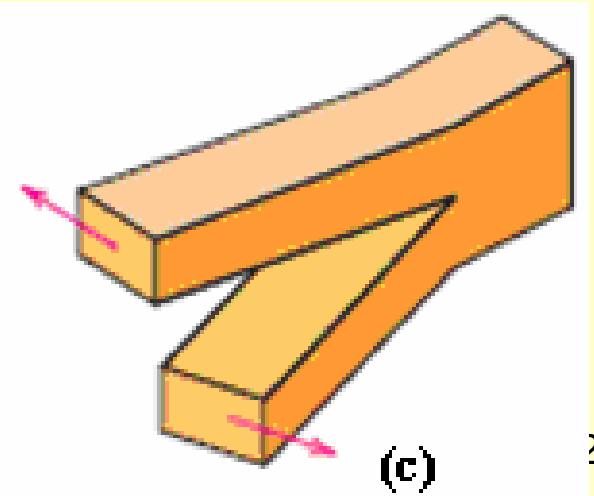
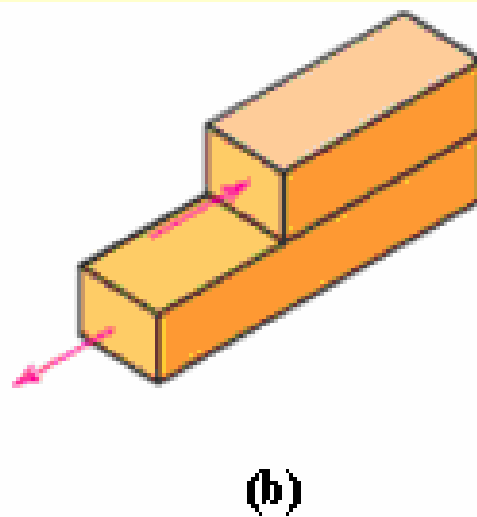
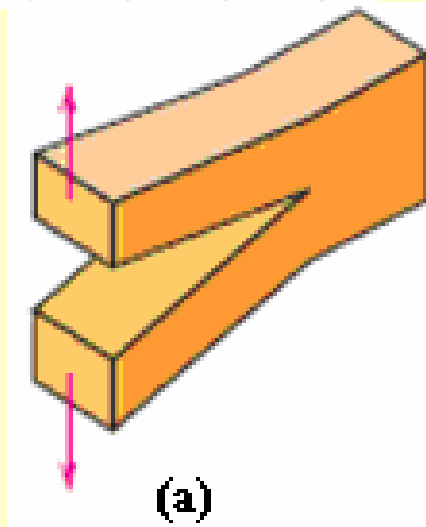
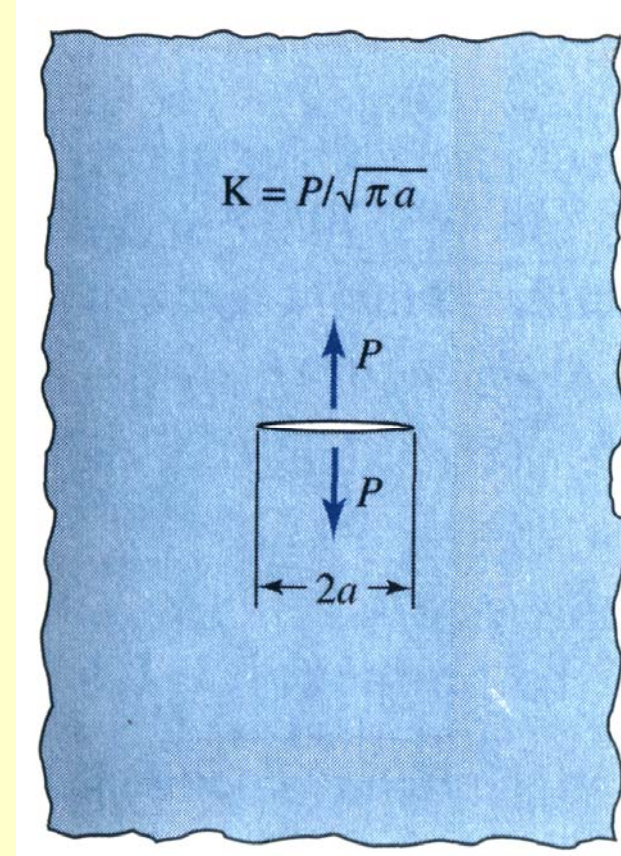
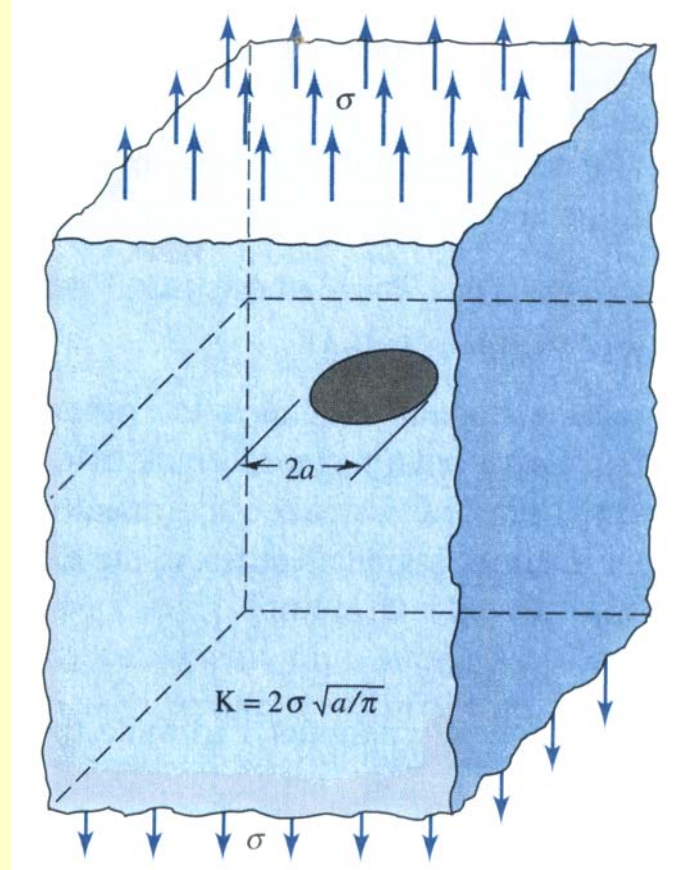
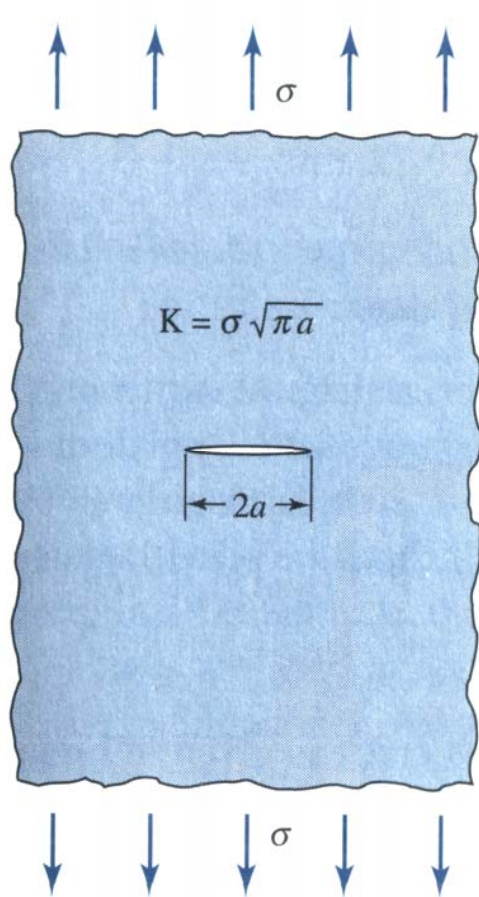




- Phân tích các tai nạn, người ta thấy rằng:
 - ✓ đứt giòn thường xảy ra với vật liệu có độ bền cao (thép D6AC của bộ phận nối cánh của máy bay F111, hợp kim nhôm của vỏ các máy bay Comet và 737),
 - ✓ có cấu trúc hàn (các tàu) hoặc cấu trúc đúc (bánh xe lửa).
- Các tai nạn thường bắt đầu từ các vết nứt nhỏ mà quá trình kiểm tra không phát hiện được.
- Các vết nứt nhỏ sẽ phát triển chậm do có tải lặp lại (mỏi) hoặc do ăn mòn → vết nứt đạt đến một kích thước giới hạn thì đứt gãy sẽ xảy ra nhanh chóng.

Dự báo đứt giòn

- Mục đích:
 - ✓ tìm một thông số để dự báo kích thước vết nứt mà ở đó bắt đầu xảy ra đứt gãy
 - ✓ với một kích thước vết nứt cho trước đi tìm một ứng suất làm việc an toàn nhất.
- Khi có vết nứt thì ứng suất áp đặt sẽ được phóng đại lên ở vùng lân cận vết nứt.
→ thông số cường độ ứng suất $K [MPa \sqrt{m}]$ (stress intensity parameter).
- Từ các lý thuyết của George Irwin (1950 – 1960) người ta đã xác định giá trị K tùy thuộc vào dạng hình học của vết nứt.
(Giả thiết kích thước vật thể $\gg$ kích thước vết nứt).



- Khi đứt xảy ra thì $K \rightarrow K_{gh}$.
- K_{gh} không chỉ phụ thuộc vào loại vật liệu mà còn phụ thuộc bề dày của vật thể.
- Giá trị K_{gh} trên các phần dày hơn được gọi là độ bền đứt của vật liệu cho biết độ dai (toughness) của vật liệu và có ký hiệu là K_{Ic} (theo kiểu I).
- Độ dai trên các phần mỏng sẽ lớn hơn trên các phần dày do có biến dạng dẻo trên một đơn vị thể tích nhiều hơn.
- Giá trị K_{Ic} trong sổ tay chỉ được sử dụng khi bề dày của vật thể lớn hơn bề dày tối hạn.
- $B = 2,5 K_{Ic}$: độ bền đứt [$\text{MPa} \sqrt{\text{m}}$]
- Độ bền đứt thường tỉ lệ với diện tích dưới đường cong ứng suất biến dạng.
- Gốm có độ bền cao, độ dẻo thấp, polyme không định hướng có độ dẻo cao, độ bền thấp.
- Cả hai vật liệu này đều có diện tích dưới đường cong nhỏ hơn của kim loại nên sẽ có giá trị K_{Ic} nhỏ hơn.

10.3 Mỏi (Fatigue)

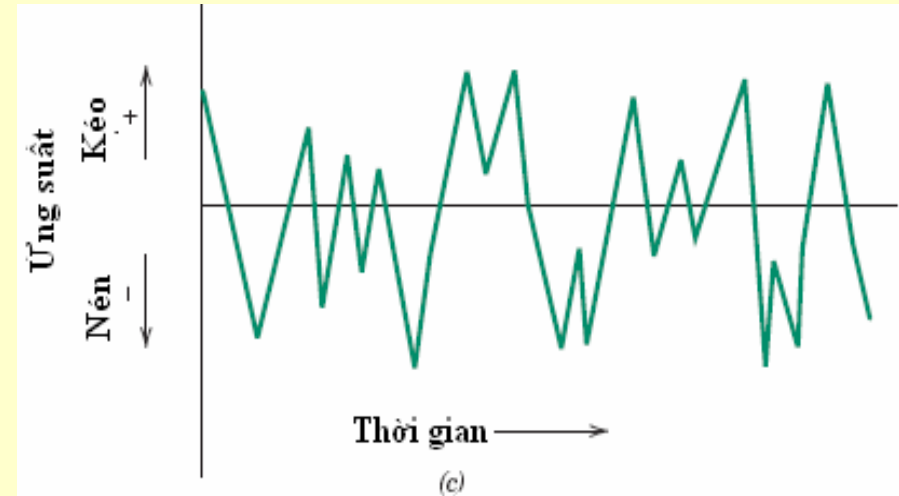
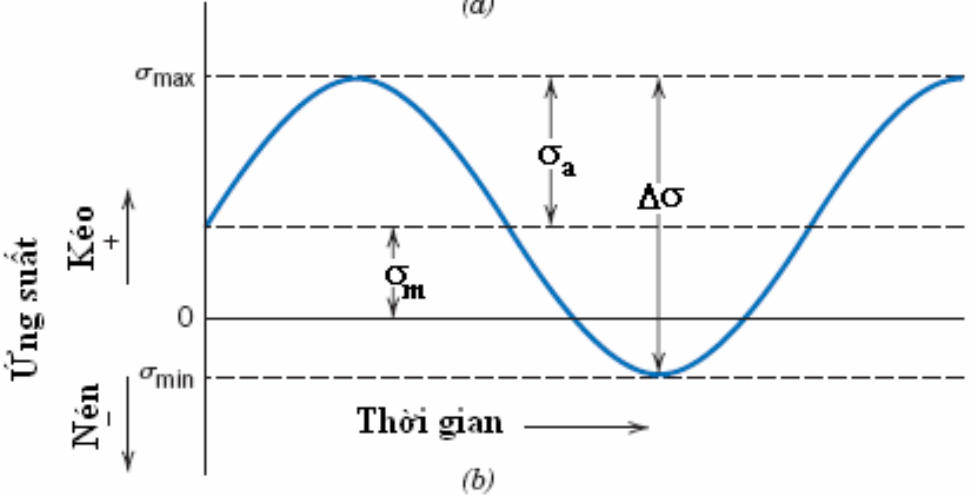
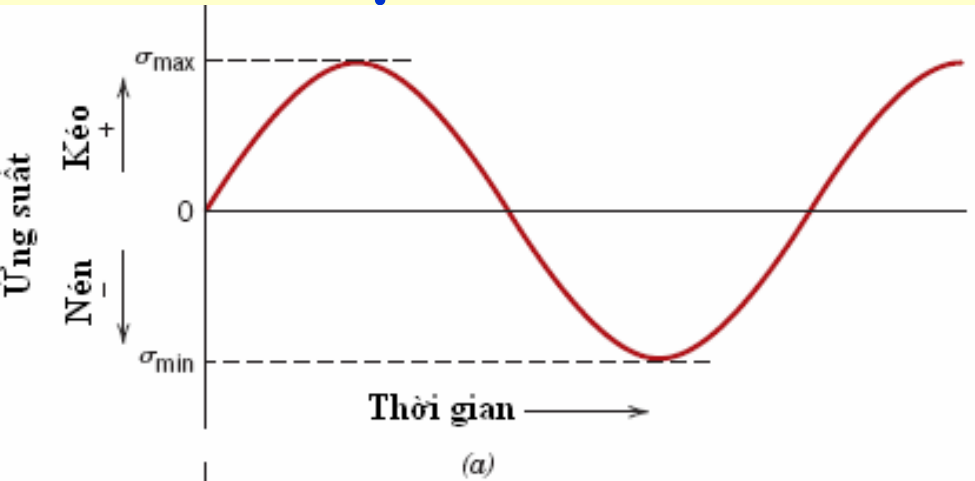
10.3.1 Khái niệm

- Mỏi là nguyên nhân chủ yếu gây đứt gãy vật liệu.
 - Mỏi có thể xảy ra với kim loại, polyme, gốm trong đó gốm ít bị mỏi nhất.
 - Ví dụ: Bẻ gập một tấm kim loại theo một hướng đến khi nó gập lại. Vùng gập lại sẽ bị biến dạng dẻo nhưng không gãy. Nếu bẻ gập theo hướng ngược lại và lặp lại nhiều lần thì tấm kim loại sẽ bị gãy.
- với tải lặp lại có chu kỳ thì tấm kim loại sẽ bị gãy ở một tải trọng nhỏ hơn rất nhiều, so với tải cần thiết để bẻ gãy tấm kim loại trong một lần đặt tải.

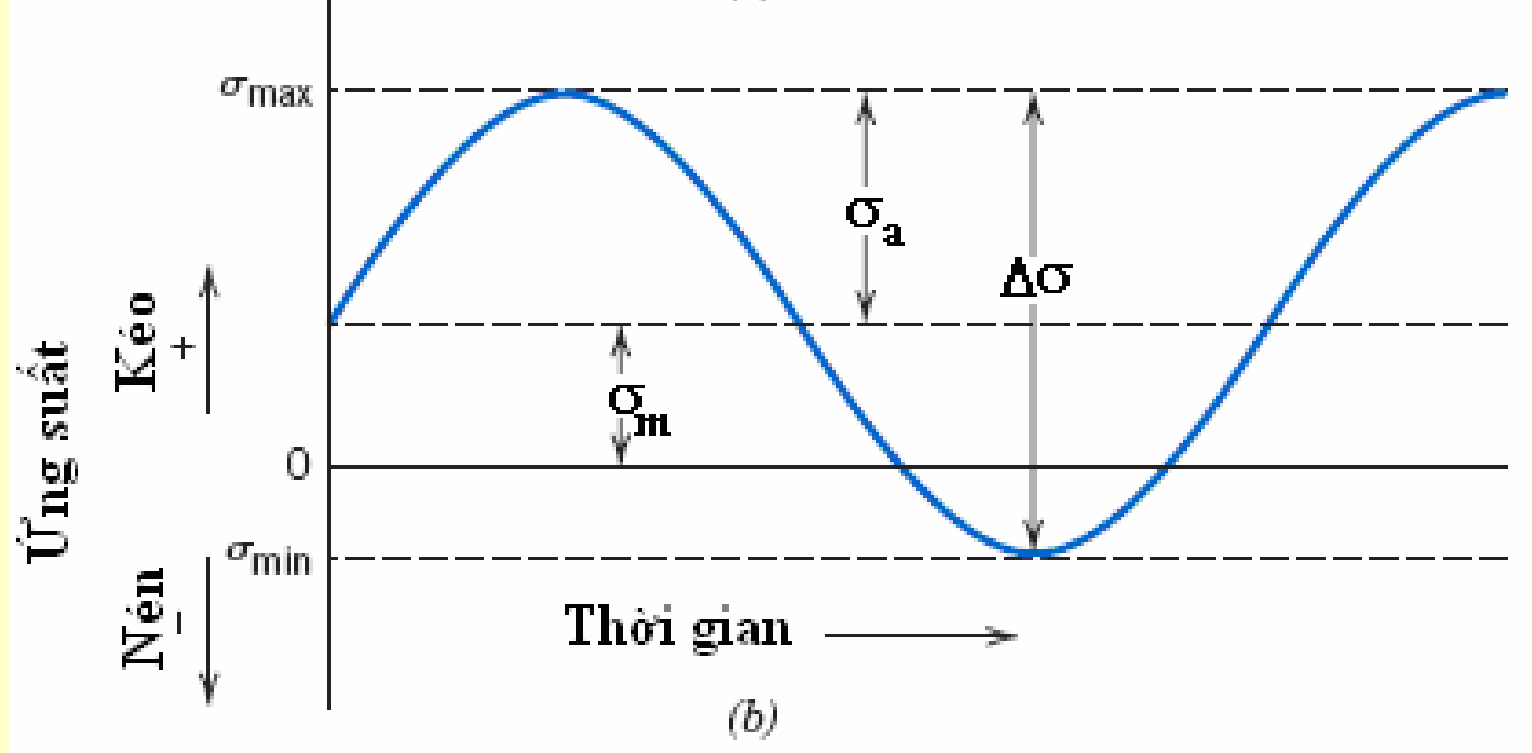
Tiến trình mỏi:

- ✓ Sự tác động lần đầu của tải gây nên biến dạng dẻo, khi đó các lệch sẽ di chuyển và tương tác với nhau.
- ✓ Sự tương tác giữa các lệch sẽ làm giảm khả năng di chuyển của lệch và muốn tiếp tục biến dạng thì phải tạo ra càng nhiều lệch.
- ✓ Việc gia tăng mật độ lệch → làm giảm tính hoàn thiện tinh thể của vật liệu → các vết nứt và các vết này khi đạt đến một kích thước đủ lớn → đứt gãy.

10.3.2 Giới hạn bền mỏi

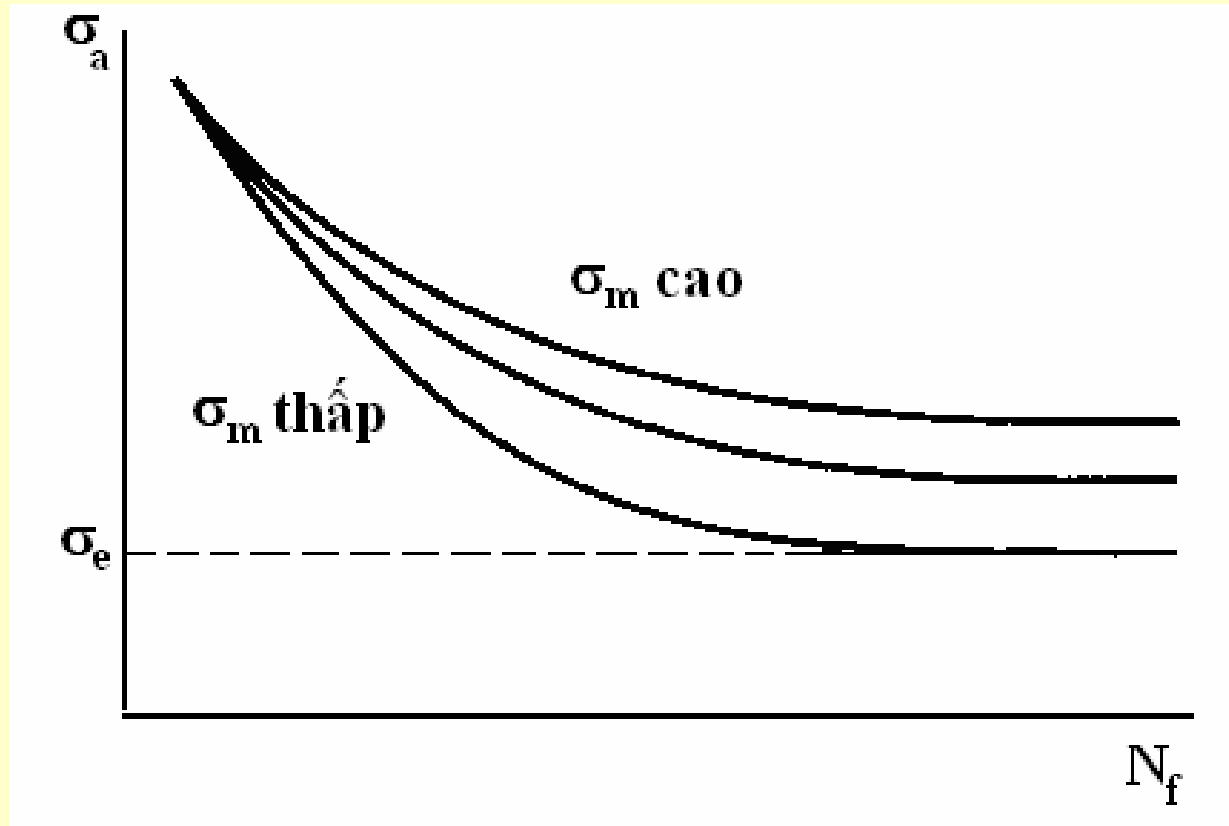


- (a) $\sigma_{\max}$ đối xứng với $\sigma_{\min}$ qua trục thời gian
- (b) $\sigma_{\max}$ và $\sigma_{\min}$ không đối xứng qua trục thời gian
- (c) chu kỳ ứng suất ngẫu nhiên



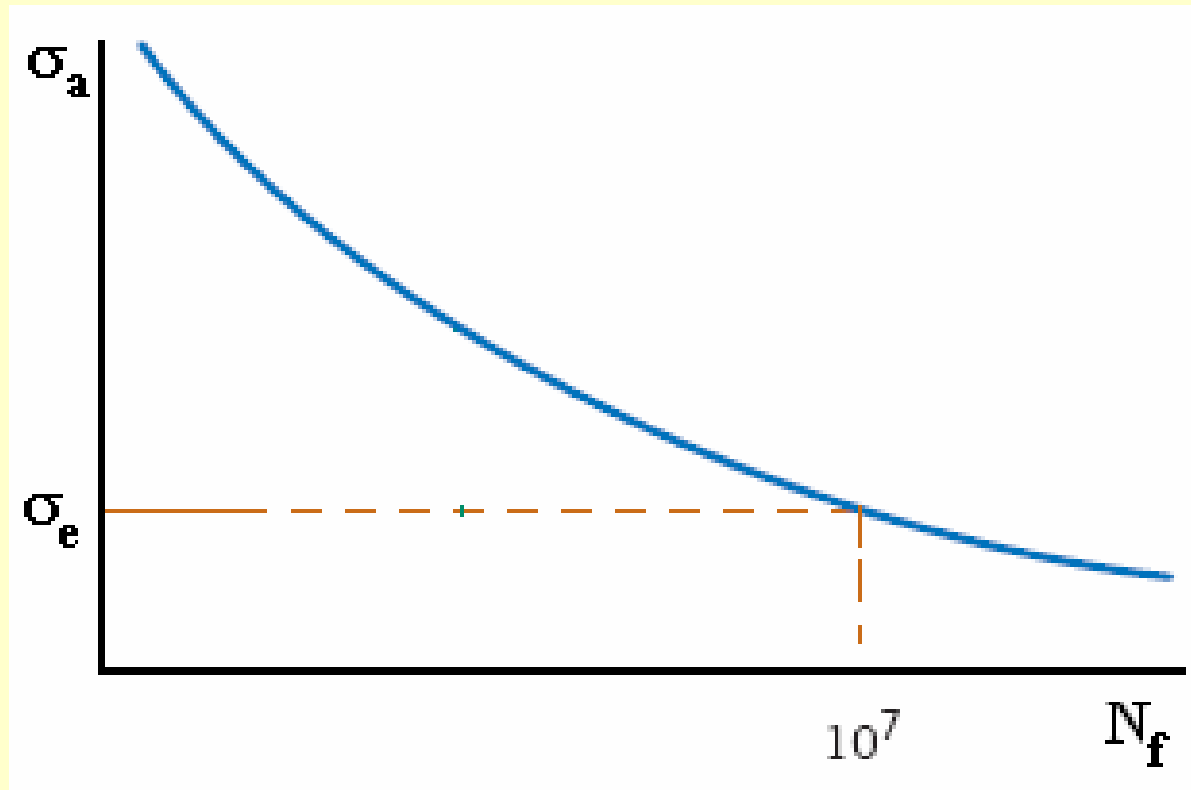
- Gọi: ứng suất cực đại, cực tiểu là $\sigma_{\max}$ và $\sigma_{\min}$
- Khoảng ứng suất $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$
- Biên độ ứng suất: $\sigma_a = \frac{\Delta S}{2} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$
- Số chu kỳ mỗi đến khi đứt N_f
- Số chu kỳ mỗi trong 1 giây gọi là tần số chu kỳ.
- Ứng suất trung bình: $\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$

- Khi thay đổi $\sigma_{\max}$ và $\sigma_{\min}$ sao cho σ_m không đổi và σ_a giảm. Vẽ σ_a theo N_f sẽ được đường cong biên độ ứng suất theo số chu kỳ mỏi.
- Thay đổi σ_m sẽ thu được các dạng đường $\sigma_a - N_f$ với σ_m từ thấp đến cao



- Ở một số vật liệu (thép C, một số polyme) có tồn tại một biên độ ứng suất giới hạn gọi là giới hạn bền mỏi σ_e .
- Khi $\sigma < \sigma_e$ thì đứt do mỏi sẽ không xảy ra bất kể số chu kỳ là bao nhiêu. σ_e sẽ giảm khi tăng σ_m .

- Ở một số vật liệu khác (Nylon, Al, Cu, và các kim loại Fcc khác) sẽ không biểu hiện rõ giới hạn bền mỏi → giới hạn bền mỏi được lấy ở biên độ ứng suất với số chu kỳ mỏi là 10^7 chu kỳ



- Quan hệ giữa độ bền kéo σ_b và giới hạn bền mỏi σ_e
- $0,25 < (\sigma_e / \sigma_b) < 0,5$
- Điều kiện mỏi $K_{Ic} = \sigma_b \sqrt{\pi a}$

10.4 Đặc tính phụ thuộc thời gian (Time – dependent behavior)

- Trong môi trường xâm thực hoặc ở nhiệt độ cao, đặc tính ứng suất – biến dạng và đứt của vật liệu trở thành phụ thuộc thời gian.
- Khi đó tần số chu kỳ (trong việc xác định N_f) hoặc tốc độ tăng tải (trong việc xác định đường cong ứng suất – biến dạng) sẽ trở nên quyết định.

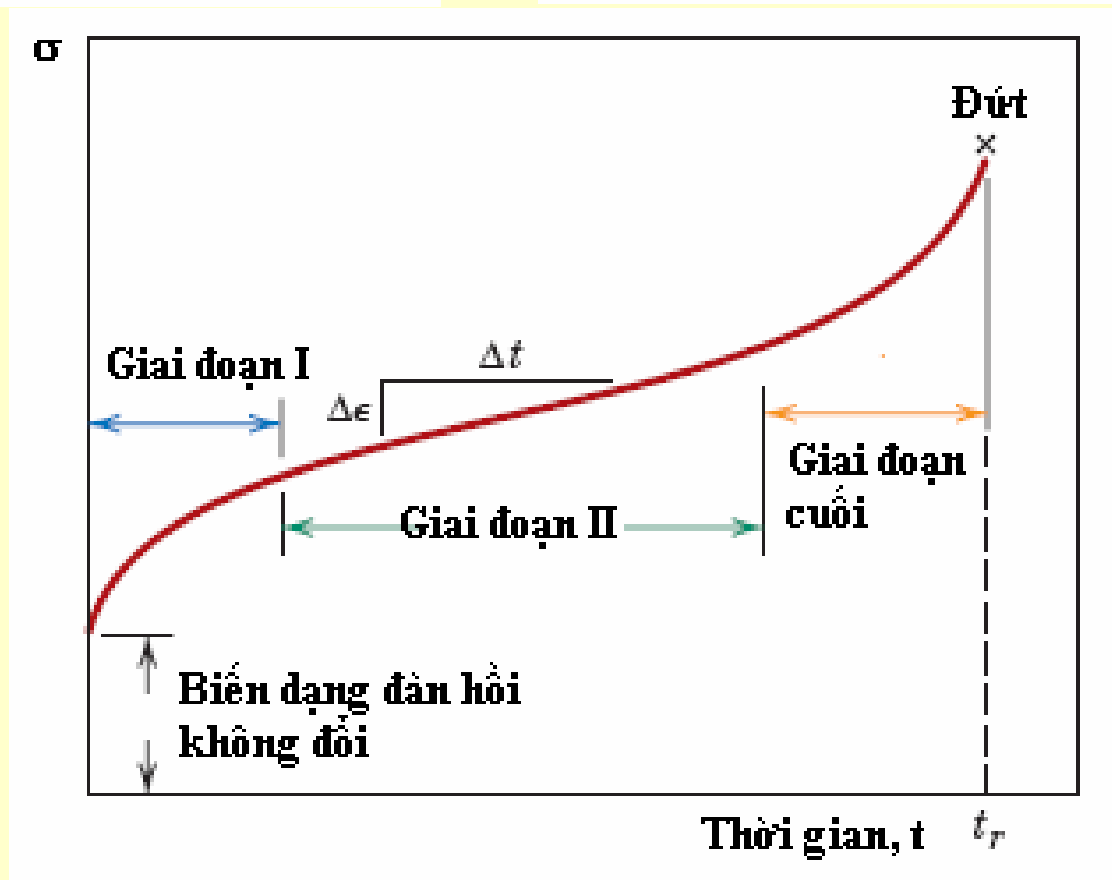
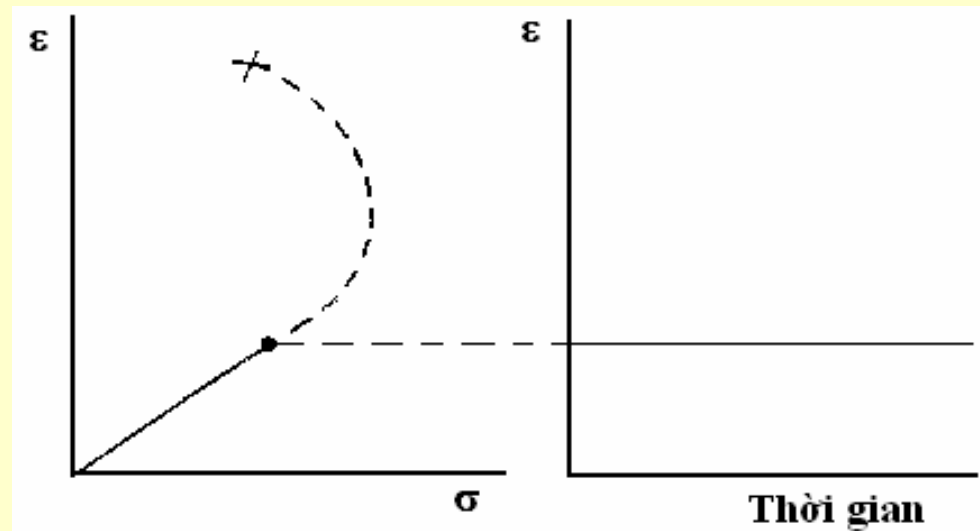
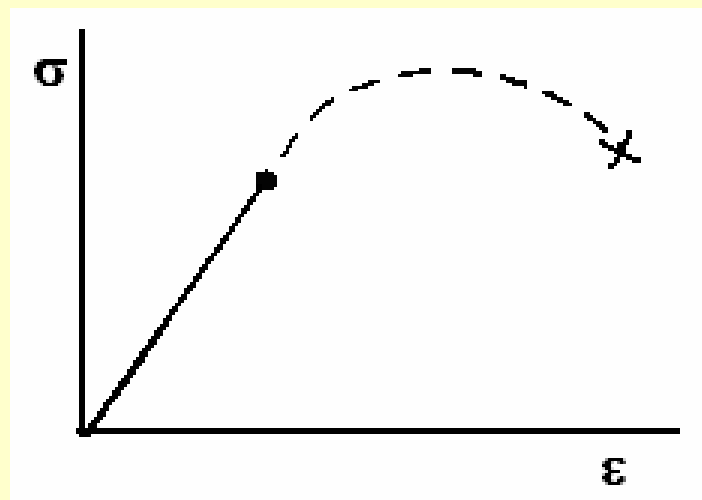
10.4.1 Đứt gãy do môi trường

- Môi trường xâm thực sẽ phản ứng với vật liệu làm giảm khả năng chịu lực của nó. Tùy thuộc vào tốc độ đặt tải mà thời gian hư hỏng có thể thay đổi rất đáng kể.
 - ✓ Ví dụ: Việc lựa chọn vật liệu để chế tạo tàu thủy và các công trình ngoài khơi.
 - ✓ Thông thường người ta dùng thép có độ bền cao (high–strength steels) để giảm khối lượng kết cấu.
 - ✓ Tuy nhiên nếu giới hạn ứng suất cho phép của thép có độ bền cao trong môi trường nước biển lớn hơn một giới hạn thì đứt gãy do môi trường sẽ xảy ra.
- giá trị độ bền và khả năng chịu ăn mòn phải được cân nhắc để có khối lượng tối ưu.

- **Đối với polyme:**
 - ✓ Nhiều loại polyme hoặc composit hấp thu ẩm và giảm tính chất theo thời gian,
 - ✓ Nhiều loại khác trong môi trường giàu hydrocacbon có thể thay đổi cấu trúc phân tử và trở nên giòn hơn.
 - ✓ Ngoài ra, nhiều loại polyme cũng trở nên giòn hơn khi tiếp xúc lâu dài với tia tử ngoại hoặc tia phóng xạ có năng lượng cao.
- **Đối với gốm:** Trong các loại vật liệu thì gốm có độ chịu môi trường cao hơn, ngoại trừ một số trường hợp như thủy tinh trong môi trường nước hoặc trong HF.

10.4.2 Rão (Creep)

- Khi áp đặt một ứng suất nhỏ hơn độ bền chảy ở nhiệt độ phòng thì biến dạng có thể tính được từ định luật Hooke .
- Biến dạng này nói chung sẽ không thay đổi theo thời gian khi tải cố định.
- Nếu lặp lại thí nghiệm với tải cố định nhưng ở nhiệt độ cao ($T^0 > (0,30,5) T_m$) (với T_m là nhiệt độ nóng chảy, K) thì biến dạng nhận được sẽ tăng theo thời gian sau bước biến dạng đàn hồi ban đầu.



- Rão có thể được định nghĩa là biến dạng dẻo xảy ra ở nhiệt độ cao dưới ứng suất không đổi (ứng suất nhỏ hơn giới hạn đàn hồi) trong một khoảng thời gian dài.
- Tính chất rão phụ thuộc nhiều vào cấu trúc vi mô của vật liệu, quá trình gia công và thành phần của kết cấu.
- Đường cong biến dạng rão có 3 giai đoạn, sau bước biến dạng đàn hồi ban đầu tại $\tau = 0$ là ε_0
- Giai đoạn I: tốc độ biến dạng thấp (độ dốc đường cong thấp). Trong giai đoạn này, độ biến dạng tăng là do tăng khả năng dịch chuyển của các nguyên tử đã được hoạt hóa nhiệt, tạo ra các mặt trượt bổ sung và lệch di chuyển dễ dàng hơn (theo cơ chế leo như đã trình bày trong phần khuyết tật đường).

$$\varepsilon = A\tau^{1/3} \quad \varepsilon: \text{biến dạng rão} \quad \tau: \text{thời gian} \quad A: \text{const}$$

- Giai đoạn II: tốc độ biến dạng không đổi trong miền này, sự tăng khả năng trượt do độ dịch chuyển ở nhiệt độ cao được cân bằng với sự cản trở trượt do tạo ra lệch và các rào cản trong cấu trúc.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \beta t \quad \beta = \text{const}$$

- **Giai đoạn III: Tốc độ biến dạng tăng do tăng ứng suất thực khi tiết diện mẫu giảm. (Mẫu bị thắt lại hoặc do tạo các vết nứt bên trong)**
$$\varepsilon = B + C \exp(\gamma t) \quad B, C, \gamma = \text{const}$$
- **Đối với kim loại, gốm thì rão xảy ra do quá trình khuếch tán của các khuyết tật điểm, do sự trượt của biên giới hạt và do dịch chuyển lệch.**
- **Đối với polyme, rão do sự trượt các phân tử với nhau.**