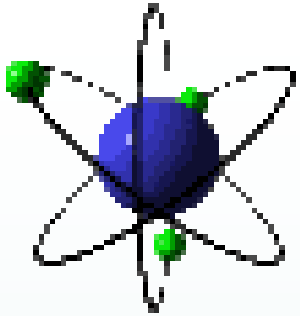


جامعة الأنبار
كلية التربية
قسم الفيزياء
المرحلة: الأولى
الدراسة الصباحية
المادة: الحرارة وخواص المادة

الخواص الميكانيكية للمواد الصلبة:

Mechanical Properties of Solid Materials

يختص هذا الفصل بدراسة سلوك المواد الواقعة تحت تأثير قوى خارجية. إن استجابة المواد للقوى المؤثرة عليها يعتمد على عوامل عديدة (1. منها ترتيب الذرات والجزيئات المكونة للمادة و2. نوع الترابط بين هذه الذرات والجزيئات 3. كما تعتمد على أنواع وأعداد عيوب التركيب في المواد الصلبة)، وعليه فان الخواص الميكانيكية تكون ذات أهميه في تحديد صفات المادة ومدى ملائمتها للاستخدام في التطبيقات الصناعية.

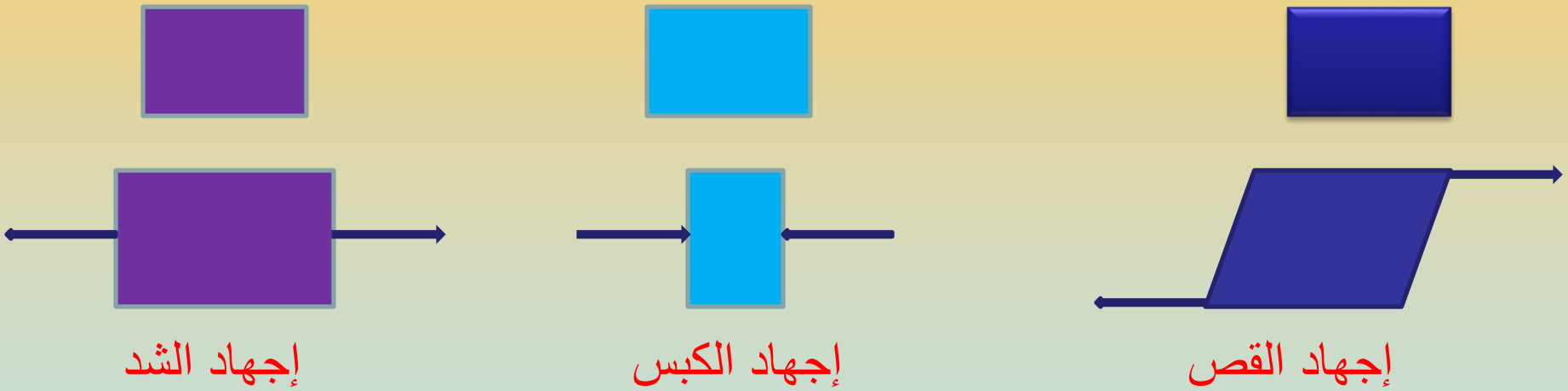
يهتم المهندسون كثيراً بالخواص الميكانيكية للمواد المتوفرة لديهم عند إقدامهم لتنفيذ أي عمل هندسي من بناء الجسور والمركبات والحاسبات الالكترونية إلى بناء المركبات الفضائية. سيقدم هذا الفصل أساسيات الخواص الميكانيكية كالإجهاد والانفعال وأنواعهما وعلاقتهما للمواد المتجانسة والتي تمتلك الخواص نفسها في جميع الاتجاهات(Isotropic)، وسوف تستثنى المواد التي تعتمد خواصها على الاتجاه داخل المادة (Anisotropic). قبل الخوض في مفردات هذا الفصل يجب التذكر دائماً إن جميع المواد الصلبة الحقيقية تستجيب إلى حدٍ ما عند تسليط قوى خارجية عليها، حيث لا يوجد جسم تام الصلادة. يعرف الجسم التام الصلادة (rigid) على انه ذلك الجسم الذي تبقى فيه المسافة بين أية نقطتين منه ثابتة لا تتغير مهما كان مقدار القوى المسلطة عليه.

الإجهاد: Stress (S)

يُعرف بأنه القوة المسلطة على وحدة المساحات من السطح الذي تطبق عليه القوة. ووحدة الإجهاد (N/m^2) أو ($dyne/cm^2$) أو (lb/in^2) أو (lb/ft^2). فإذا رمزنا للقوة بـ (F) والمساحة (A) فان:

$$S=F/A$$

ويمكن أن نقسم الإجهاد إلى ثلاثة أنواع هي الشد والكبس والقص كما في الشكل (1):



شكل(1): أنواع الاجتهاد.

1. الإجهاد التوتري (إجهاد الشد): Tensile Stress (S_T)

وفيه تؤثر قوتان متساويتان في المقدار متعاكستان في الاتجاه على نهايتي الجسم وعلى نفس خط التأثير، وعليه فان تأثير القوتين يؤدي إلى استطالة الجسم تتوزع القوة بالتساوي على جميع المساحة A (ما عدا نهايتي الجسم). كما في الشكل (3).

$S_T=F/A$

شكل(2): إجهاد الشد.

2. إجهاد الكبس: Compressive Stress (S_c)

وفيه تؤثر قوتان متساويتان في المقدار متعاكستان في الاتجاه (متقابلتان) على نهايتي الجسم وعلى نفس خط التأثير، وعليه فان تأثير القوتين يؤدي إلى ضغط الجسم وتقصير طوله كما في الشكل (3).

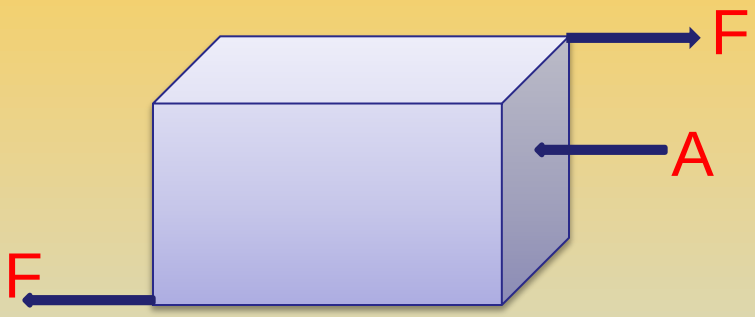
$S_C=F/A$

الشكل (3): أجهاد الكبس.

3. إجهاد القص: Shear Stress (S_s)

وفيه تؤثر قوتان متساويتان في المقدار متعاكستان في الاتجاه (مبتعدتان) على نهايتي الجسم وعلى خطوط تأثير مختلفة كما في الشكل (4)، وعليه فان تأثير القوتين يؤدي إلى تغير شكل الجسم دون تغير حجمه.

$S_s=F/A$



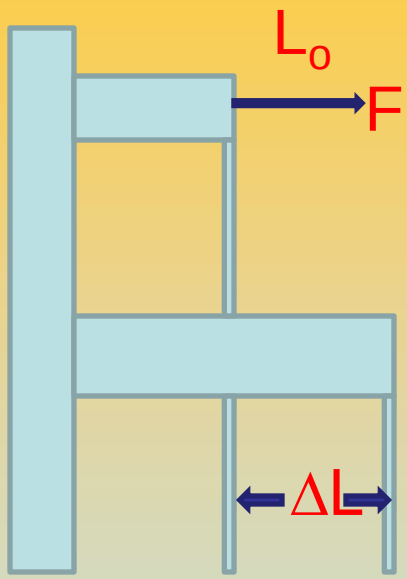
الشكل(4): إجهاد القص.

الانفعال (المطاوعة): Strain (N)

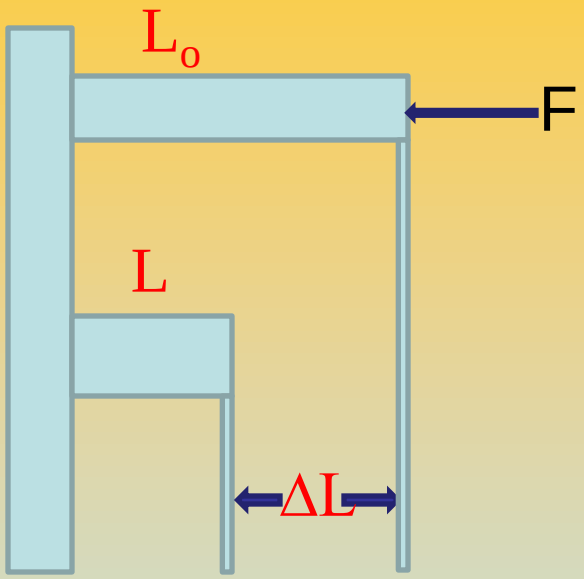
يُعرف انفعال أو مطاوعة مادة بأنة تشوه تلك المادة. كما ويعرف أيضا على انه التغير النسبي الذي يسببه الإجهاد لأبعاد الجسم أو شكله أو حجمه. وبما أن هناك عدة أنواع للإجهاد فسيكون هناك عدة أنواع للمطاوعة (الانفعال) تبعاً لذلك وهي مطاوعة الشد (التوتر) ومطاوعة الكبس ومطاوعة القص. إن المطاوعة بجميع أنواعها نسبة مجرد من الوحدات.

1. مطاوعة التوتر: Tensile Strain (N_T)

ويعبر عن مطاوعة التوتر بأنه نسبة الاستطالة إلى الطول الأصلي، وتساوي (الاستطالة/الطول الأصلي)، أي أن: $N_T = \frac{\Delta L}{L_o}$



شكل(5): مطاوعة التوتر.



شكل(6): مطاوعة الكبس.

2. مطاوعة الكبس: Compressive Strain (N_C)

ويعبر عن مطاوعة الكبس بأنه نسبة الانكماش (التقلص) إلى الطول الأصلي، وتساوي (الانكماش/الطول الأصلي) أي أن:

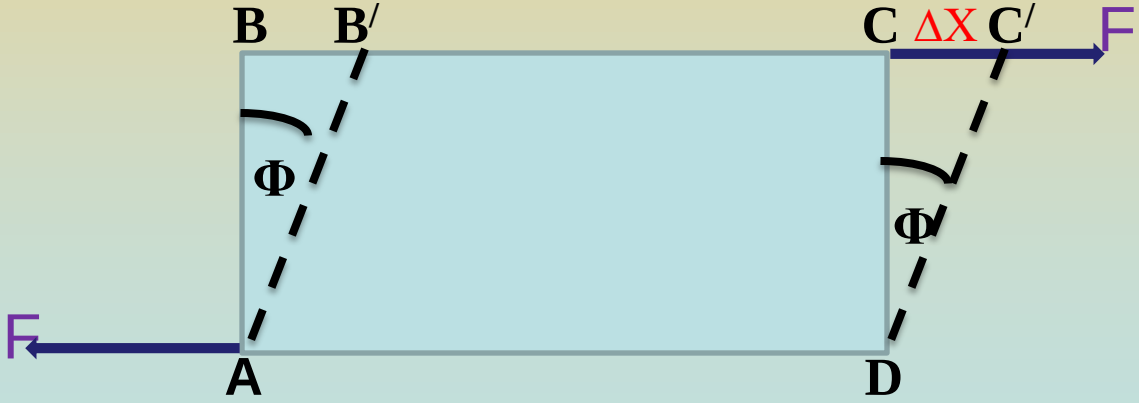
$$N_C = \frac{\Delta L}{L_o}$$

3. مطاوعة قصية: Shear Strain (N_S)

ويعبر عن المطاوعة القصية بمقدار الإزاحة الجانبية للطول مثلاً إلى الطول الأصلي، وتساوي:

$$N_S = \frac{\Delta X}{L_O} = \tan\phi \cong \phi$$

كما ويعبر عن النسب المذكورة في أعلاه بدلالة النسبة المئوية نسبة إلى الطول الأصلي. إذا زال الانفعال بصورة تامة ومباشرة بعد إزالة الإجهاد الذي سببه، سمي الجسم الصلب بأنه تام المرونة Perfectly elastic. أما إذا اكتسب الجسم شكلاً وحجماً جديدين بعد إزالة الإجهاد المسبب لهما، سمي الجسم تام اللدونة Perfectly Plastic. وفي الحقيقة لا يوجد جسم تام المرونة، كذلك لا يوجد جسم تام اللدونة.



الشكل(7): مطاوعة القص.

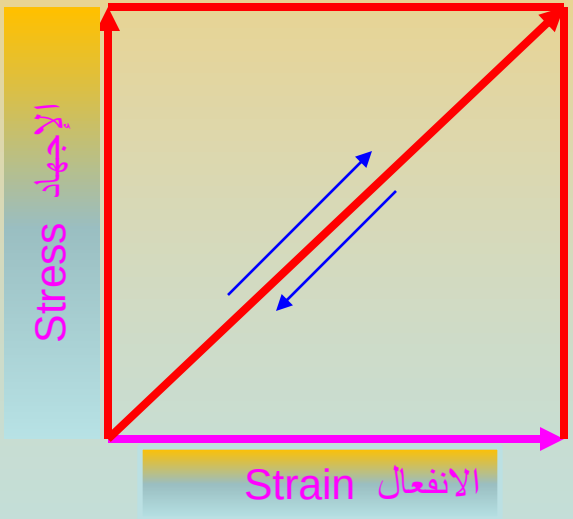
أنواع الانفعال Kinds of Strain

وكذلك تكون المطاوعة (الانفعال) على نوعين هما:

1. الانفعال المرن.
2. الانفعال اللدن.

1. الانفعال المرن Elastic Strain

وهو انفعال عكسي، إذ يتلاشى الانفعال بعد إزالة الإجهاد المسلط، إن قيمة الانفعال المرن تتناسب طردياً مع مقدار الإجهاد المسلط، كما هو موضح في الشكل (8).

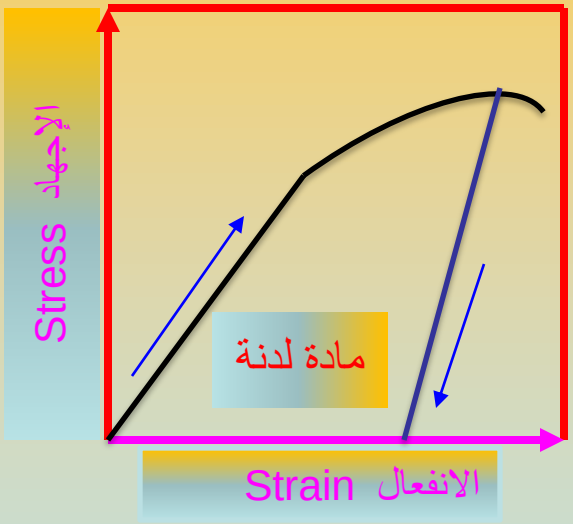


الشكل (8) علاقة الانفعال – الإجهاد للجسم المرن

ومن أمثلة هذه المواد المرنة، الياف الكواتز Quartz Fiber، التي تقترب مرونتها من المرونة التامة.

الانفعال اللدن: Plastic Strain

وهو انفعال غير عكسي، إذ لا يتلاشى الانفعال بعد إزالة الإجهاد المسلط, ويكون ذلك بفعل الإجهاد الذي يتجاوز حدود المرونة، ويحدث الانفعال اللدن نتيجة الإزاحة الدائمية للذرات داخل المادة؟، على عكس الانفعال المرن الذي لا يحدث إزاحات دائمية للذرات ويبقى لكل ذرة نفس الذرات المجاورة لها قبل وبعد تسليط الاجتهاد ومن أمثلة هذه المواد اللدنة, المعاجين Putty التي تقترب لدونتها من اللدونة التامة. الشكل (9) يوضح الانفعال اللدن.



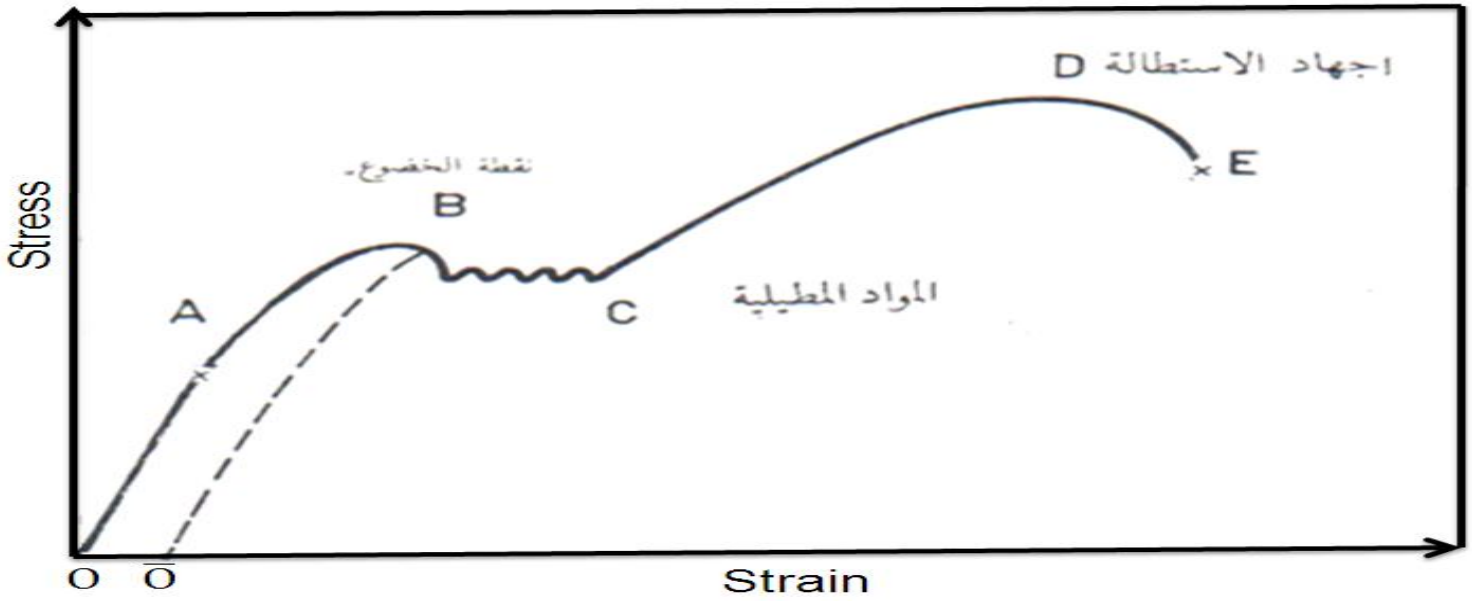
الشكل (9) علاقة الانفعال – الإجهاد للجسم اللدن.

منحنى الإجهاد – الانفعال Stress – Strain Curve

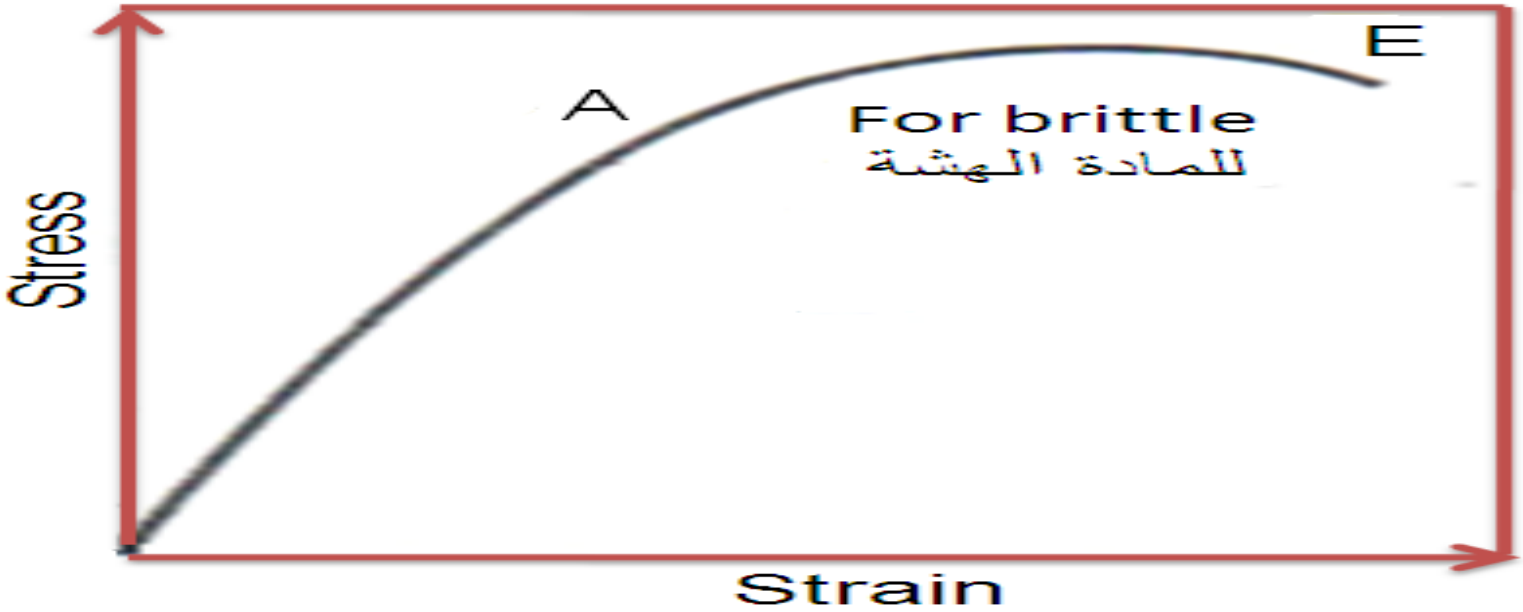
أن العلاقة بين الإجهاد المسلط على جسم ما والانفعال الناتج عنه، علاقة معقدة تعتمد على عوامل عدة، منها 1. قوى الترابط بين ذرات وجزيئات المادة، 2. وكيفية ترتيب هذه الذرات والجزيئات 3. والعيوب البلورية التي تحتويها المادة، فضلاً عن 4. طريقة تحضير هذه المادة وتاريخها الحراري. وسنقتصر على شرح منحني الإجهاد – الانفعال لسلك من الفولاذ. لو أخذنا سلكاً من الفولاذ وعرضناه إلى جهد متزايد (ثقل) ورسمنا العلاقة بين الإجهاد والانفعال. إن منحي الإجهاد – الانفعال يوضحه الشكل (10)، والذي يبين إن الجزء OA يمثل خطاً مستقيماً وهي المنطقة التي يطبق فيها قانون هوك (أي إن الانفعال يتناسب طردياً مع الإجهاد المسلط عليه) وفيها النقطة A التي تمثل نهاية المنطقة المستقيمة. وبعد النقطة A نجد إن الخط البياني ينحني، ويزداد الانفعال بصورة اكبر مما هو متوقع من قانون هوك. وتستمر هذه المنطقة إلى النقطة B . إن الاستطالة في هذه المنطقة تكون خليطاً من الاستطالة المرنة والاستطالة اللدنة. أما المنطقة المحصورة بين B و C والتي تكون موازية تقريباً لأحداثي الانفعال فيكون تغير المنحي فيها غير منتظم وان الانفعال يزداد بشكل كبير دون زيادة محسوسة في الإجهاد المسلط. إن نقطة بداية المنطقة BC ، تسمى بنقطة الخضوع (yield point). وفي المنطقة الواقعة بعد النقطة C والتي يحدث فيها انزلاقات في مادة السلك باتجاه المستويات ذات الإجهاد الكبير، سوف تتغير الخواص المرنة للمعدن، وان الاستطالة في هذه المنطقة تكون نتيجة للإجهاد القصي وليس نتيجة إجهاد الاستطالة. ومن الملاحظ إن النقطة C تقع تحت النقطة B . ويزداد الانفعال تبعاً لزيادة الإجهاد بصورة مطردة إلى أن نصل إلى نقطة تبدأ فيها حالة عدم الاستقرار، ويصبح السلك أكثر نحافة عند إحدى نهايتيه، ويظهر ظاهرة التخصر (necking) وهذه المرحلة تمثلها النقطة D. والتي بعدها يبدأ الإجهاد بالانخفاض تلقائياً ونحصل على المنطقة DE . ويحدث الانقطاع عند النقطة E . يطلق أحيانا على قيمة الإجهاد عند النقطة D بـ إجهاد الكسر (القطع) أو المتانة القصوى أو متانة السحب.

بعض الملاحظات المهمة:

1. أن نقصان مساحة المقطع العرضي للسلك يتناسب طردياً مع الانفعال بعد النقطة المرنة، بحيث يبقى حجم السلك ثابتاً.
2. إذا أزداد الإجهاد إلى حد لم يتجاوز فيه حد المرونة فان المنحني سيكرر نفسه عند تناقص الإجهاد وان الانفعال سيصل إلى قيمة الصفر عند إزالة الإجهاد.
3. أما إذا ازداد الإجهاد إلى حد يتجاوز فيه حد المرونة، فان منحنياً جديداً سوف يظهر (المنحني المنقط في الشكل (10). وان الانفعال لا يرجع إلى قيمة الصفر عند إزالة الإجهاد.
4. إن فشل تطابق منحني تناقص الإجهاد مع منحني زيادته يعرف بـ الهسترة المرنة، المشابهة للهسترة المغناطيسية.
5. إن المادة التي تكون فيها المنطقة CE طويلة نسبياً، تكون قادرة على تحمل زيادة في الطول قبل القطع تسمى بالمادة المطيلية (Ductile). أما المادة التي تكون فيها المنطقة CE قصيرة نسبياً وسوف تنقطع عند تعرضها إلى زيادة ولو بسيطة في طولها تعرف بالمادة الهشة (Brittle)، انظر شكل (11). يأخذ المهندسون بنظر الاعتبار عدم تجاوز الإجهاد الأعظم لجزء محدد من إجهاد الكسر ويعرف هذا الجزء أو الكسر بإجهاد العمل (Working Stress) وان نسبة إجهاد الكسر إلى إجهاد العمل تعرف بعامل السلامة (Factor of Safety).



الشكل (10) منحنى الانفعال – الإجهاد لسلك الفولاذ.



الشكل (11) منحنى الانفعال – الإجهاد للمادة الهشة.

معامل المرونة: Modulus of Elasticity

تعرف المرونة على أنها قابلية المادة على استعادة شكلها الأصلي بعد إزالة القوة المؤثرة والمسببة للتشوه. هناك أنواع مختلفة من المعاملات، يعتمد نوع المعامل على نوع التشوه الذي تتعرض له المادة. كالاستطالة والانحناء وغيرها. وتمثل جميع المعاملات بإيجاد نسبة الإجهاد إلى الانفعال. إن وحدات المعامل هي وحدات الإجهاد نفسه لان الانفعال لا وحدات له. وعندما يكون الإجهاد ضمن حدود المرونة. فان نسبة الإجهاد إلى المطاوعة ستكون مقداراً ثابتاً، ويسمى هذا الثابت بمعامل المرونة Modulus of elasticity، أي أن:

معامل المرونة = (الإجهاد/الانفعال) أي أن (Modulus of Elasticity=Stress/Strain).

يعرف الحد المرن على انه أقل قيمة للإجهاد المسبب لانفعال (مطاوعة) ثابت في المادة. وضمن حدود المرونة تكون العلاقة خطية بين الإجهاد والانفعال ولا يعتمد على الزمن، وهذا ما يعرف بقانون هوك (Hooks Law). الذي ينطبق على معظم المواد المرنة في حالة حصول الانفعالات الصغيرة. إن العلاقة بين معامل المرونة ودرجة الحرارة علاقة عكسية، إذ يقل معامل المرونة بارتفاع درجة الحرارة، والسبب في ذلك يعود إلى إن ارتفاع درجة الحرارة يزيد الطاقة الحركية للذرات أو الجزيئات والتي تؤدي إلى التغلب على قوى الترابط بينها وبالتالي زيادة حجمها.

معامل يونك: Young's Modulus (Y)

يعرف معامل يونك بأنه نسبة الإجهاد إلى المطاوعة في حالتي الاستطالة والانكماش الطوليين أي أن:

معامل يونك= (الإجهاد الطولي/الانفعال الطولي)

$$Y = \frac{F/A}{\Delta L/L}$$

$$Y = \frac{F\ L}{A\ \Delta L}$$

إن وحدة معامل يونك هي وحدة الإجهاد نفسه أي N/m^2 أو $dyne/cm^2$ أو Ib/in^2. يعتمد معامل يونك على نوع المادة وليس على أبعادها.

نسبة بواسون Poisson's Ratio (σ)

عندما يتعرض جسم إلى تأثير قوتين متساويتين في المقدار ومتعاكستين في الاتجاه (قوى سحب) فانه يستطيل (أي يزداد طوله) باتجاه قوى السحب وينكمش أو يتقلص بالاتجاه العمودي أي يقل عرضه أو سمكه، والعكس صحيح. إن النسبة بين التغير الجانبي إلى التغير الطولي يعبر عنه بـ نسبة بواسون. وهي ثابت مرونة مهم، وتكون خالية من الوحدات. إن الانفعال الناتج باتجاه قوى السحب أو الكبس يسمى بالانفعال الطولي Longitudinal Strain أما الانفعال الناتج باتجاه عمودي على اتجاه القوى المسلطة فيسمى بالانفعال الجانبي أو العرضي Lateral Strain. والانفعالان كلاهما يعتمدان على الإجهاد المسلط ونوع مادة الجسم. تكون النسبة بين المطاوعة الجانبية والمطاوعة الطولية لمادة ما ثابتة ويطلق عليها اسم نسبة بواسون، أي أن:

$$\sigma = \frac{-\Delta\omega/\omega_o}{\Delta L/L_o}$$

$$\Delta\omega = \omega - \omega_o$$

$$\Delta L = L - L_o$$

تشير الإشارة السالبة إلى حقيقة إن الزيادة الحاصلة في طول الجسم نتيجة قوى السحب يصاحبها دائماً نقصان في عرض أو سمك الجسم والعكس صحيح. إن وجود الإشارة السالبة يضمن الحصول على القيم الموجبة لنسبة بواسون وتكون القيمة العددية لنسبة بواسون لمعظم المواد حوالي (0.3). الجدول (3) يوضح قيم نسبة بواسون لعدد من المواد المعروفة.

الجدول (3) قيم نسبة بواسون لعدد من المواد المعروفة.

المادة	نسبة بواسون
الالمنيوم	0.33
النحاس	0.36
الرصاص	0.40
الزجاج العادي	0.23
الفولاذ(اللتين)	0.26
المطاط الصلب	0.43

مثال (1): بين أي من المواد الآتية يتعرض إلى إجهاد اكبر.

قطعة من الألمنيوم أبعادها 15 cm x 5 cm تحت تأثير ثقل كتله 10Kg.

قطعة من الفولاذ أبعادها 7 cm x 3 cm تحت تأثير ثقل كتله 15Kg.

قطعة من النحاس أبعادها 5 cm x 2 cm تحت تأثير ثقل كتله 5Kg.

الحل:

يعرف الإجهاد على انه القوة المؤثرة على وحدة المساحة، أي أن:

$$S = \frac{F}{A}$$

للألمنيوم

$$S = \frac{10\,Kg \times 9.8\,m/s^2}{5 \times 10^{-2}\,m \times 15 \times 10^{-2}\,m} = \frac{98\,N}{75 \times 10^{-4}\,m^2} = 1.306 \times 10^4\,N/m^2$$

للفولاذ

$$S = \frac{15\,Kg \times 9.8\,m/s^2}{3 \times 10^{-2}\,m \times 7 \times 10^{-2}\,m} = \frac{147\,N}{21 \times 10^{-4}\,m^2} = 7 \times 10^4\,N/m^2$$

للنحاس

$$S = \frac{5\,Kg \times 9.8\,m/s^2}{5 \times 10^{-2}\,m \times 2 \times 10^{-2}\,m} = \frac{49\,N}{10 \times 10^{-4}\,m^2} = 4.9 \times 10^4\,N/m^2$$

من هذا يتبين إن الفولاذ يتعرض إلى الإجهاد الأكبر.

مثال (2): قضيب من النحاس الأصفر معامل مرونته يساوي $1.1 \times 10^{12}\ N/m^2$. جد قطر القضيب الذي طوله 1m ويتعرض إلى قوة شد (سحب) مقدارها 22 N وتسبب زيادة في طوله مقدارها 1mm.

الحل:

من تعريف معامل المرونة=الإجهاد/المطاوعة

$$Y = \frac{F/A}{\Delta L/L}$$

$$A = \frac{F\ L}{Y\ \Delta L}$$

$$A = \frac{22\ N \times 1m}{1.1 \times 10^{12}\ N/m \times 10^{-3}\ m}$$

$$r^2 = \frac{A}{\pi}$$

$$r^2 = \frac{2 \times 10^{-8}\ m^2}{3.14}$$

$$r^2 = 0.6369 \times 10^{-8}\ m^2$$

$$r = 7.9 \times 10^{-5}\ m$$

مثال (3): سلك معدني طوله 2 m ، مقطعه العرضي مربع طول ضلعه 8 mm . علق به ثقل كتلته 1.2 Kg فاستطال مسافة 3 mm جد قيمة معامل يونك .

الحل:

$$Y = \frac{F/A}{\Delta L/L}$$

$$Y = \frac{F \quad L}{A \quad \Delta L}$$

$$Y = \frac{1.2\,Kg \times 9.8 \ m/s^2 \times 2\,m}{8 \times 10^{-3}\,m \times 8 \times 10^{-3}\,m \times 3 \times 10^{-3}\,m}$$

$$Y = \frac{23.52\ N}{192 \times 10^{-9}\ m^2}$$

$$Y = 1.225 \times 10^{8}\ N/m^2$$

مثال (4): قضيب معدني قطره 1 in وطوله 120 in علق به ثقل مقداره 100 Ib. جد الانفعال على امتداد القطر، مع العلم بان معامل يونك يساوي $3x10^6$ Ib/in^2 ونسبة بواسون تساوي 0.3.

الحل:

بما أن معامل يونك يعطى بالعلاقة الآتية:

$$Y = \frac{F/A}{\Delta L/L}$$

إذن الانفعال الطولي يساوي:

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{F}{A\ Y}$$

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{100\ \text{Ib}}{3.14 \times (0.5\text{in})^2 \times 3 \times 10^6\ \text{Ib/in}^2}$$

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{100}{2.355 \times 10^6}$$

$$\frac{\Delta L}{L} = 0.4246 \times 10^{-4}$$

نسبة بواسون =الانفعال العرضي/الانفعال الطولي

الانفعال العرضي = نسبة بواسون x الانفعال الطولي

Poisson's Ratio = $0.3 \times 0.4246 \times 10^{-4}$

Poisson's Ratio = 0.1273×10^{-4}

مثال (5): جد اكبر قيمة لطول سلك من الحديد يمكن أن يعلق بصورة عمودية من دون انقطاعه، علماً بان إجهاد القطع (الكسر) يساوي ($7.9x10^9$ dyne/cm^2) وان كثافة مادة السلك تساوي (7.9 g/cm^3).

الحل:

إن اكبر قيمة لطول السلك تحددها كتلة السلك المعلق.

وان كتلة السلك = حجم السلك المعلق x كثافته الكتلية

نفرض إن مساحة المقطع العرضي للسلك = A cm^2

إذن الحجم = A L cm^3

$$m = \rho V$$

$$m = 7.9 \times A L \quad (g)$$

$$S = \frac{F}{A}$$

إن وزن السلك = القوة المؤثرة

$$S = \frac{7.9 \times A \times L \times 980}{A}$$

$$S = 7742\, L \quad (dyne/cm^2)$$

إن اكبر طول يحصل عندما يسلط الكسر، أي أن:

$$7742\, L = 7.9 \times 10^9$$

$$L = \frac{7.9 \times 10^9}{7742}$$

$$L = 1.02 \times 10^6 \text{ cm}$$

مثال (6):

جد اكبر طول يمكن أن يعلق به سلك معدني بصورة عمودية قبل أن ينقطع، علماً بان إجهاد القطع يساوي ($15.2x10^9$ dyne/cm^2) وان كثافة مادة السلك تساوي (7.6 g/cm^3).

مثال (7):

قضيب معدني قطره 2 cm وطوله 100 cm علق به ثقل كتلته تساوي 100 Kg. جد الانفعال العرضي. إذا علمت أن معامل يونك لهذه المادة تساوي $2.5x10^7$ N/cm^2 ونسبة بواسون تساوي 0.27 .

مثال (8):

جد قيمة معامل يونك لسلك معدني طوله 2 m ، ومساحة مقطعه العرضي 0.625 cm^2 يستطيل مسافة مقدارها 0. 25 cm عندما يعلق به ثقل كتلته 1100 Kg ؟

مثال (9):

جد مقدار الاستطالة التي يحدثها تعليق ثقل كتلته 3 Kg بسلك طوله 1.25 cm ومساحة مقطعه العرضي تساوي 1 mm . (معامل يونك = $2.5x10^{12}$ dyne/cm^2).