

الباب الثالث

الخواص الميكانيكية للمواد

(Mechanical Properties of Materials)

- 1.3. مقدمة .
- 2.3. الخواص الميكانيكية .
- 3.3. تأثير درجة الحرارة على الخواص الميكانيكية .
- 4.3. التأكل .
- 5.3. الاختبارات الميكانيكية .
- 6.3. أنواع الاختبارات وأهدافها .
 - 1.6.3. اختبارات وتبرية .
 - 2.6.3. اختبارات استكشافية .
 - 3.6.3. اختبارات متلفة .
 - 4.6.3. اختبارات غير متلفة .
 - 5.6.3. اختبارات الإثبات .
 - 6.6.3. اختبارات التفتيش والتحري .
- 7.3. الاختبارات الميكانيكية العملية .
 - 1.7.3. اختبار الشد .
 - 2.7.3. اختبار الانضغاط .
 - 3.7.3. اختبار الصلادة .
 - 4.7.3. اختبار الصدمات .
 - 5.7.3. اختبار الانحناء .
 - 6.7.3. اختبار الكلال .
 - 7.7.3. اختبار الزحف .
 - 8.3. التصلد الانفعالي .
 - 9.3. التصلد الانفعالي .
 - 10.3. فحص المواد .
 - 11.3. تمارين .

1.3 مقدمة

في الباب الأول تم التعرض إلى أهم خواص المادة ، وقد تبين لنا أهمية وتأثير الخواص الميكانيكية على سلوك المادة بشكل خاص . ويمكن تعريف الخواص الميكانيكية للمادة بصورة عامة بمدى استجابتها للحمولات المعرضة لها ، من حيث التغييرات التي تطرأ عليها والمقاومة التي تبديها ، سواء كانت الحمولات تؤثر عليها أثناء الاستعمال أو التصنيع ، حيث تعتبر الاختبارات الميكانيكية للمادة وسيلة لقياس هذه الصفات . وسوف نقوم في هذا الباب بعرض أهم الخواص الميكانيكية للمادة لما لها من أهمية ، قبل التطرق إلى الاختبارات الميكانيكية الخاصة بها .

2.3 الخواص الميكانيكية (Mechanical Properties)

أن الخواص الميكانيكية للمواد هي الخواص التي لها علاقة بتأثير الحمولات الخارجية على المادة ، لذلك تعتبر هذه الخواص ذات أهمية بالغة نظراً لتأثيرها على سلوك المادة المستخدمة في الإنشاءات الهندسية المختلفة ، وفي هذا البند سنقوم بعرض بعض أهم هذه الخواص ومنها :

(a) الإجهاد (Stress)

يعرف الإجهاد على أنه مقدار القوة المسلطة لوحدة المساحة السطحية ، ويرمز له بالرمز σ ، ويعبر عنه (N/mm^2) أو (P/in^2) ويتم حساب الإجهاد كما سبق ذكره في الباب الأول ، وذلك بقسمة القوة على مساحة مقطع السطح المؤثرة عليه تلك القوة أي أن :

$$\sigma = \frac{P}{A_o} \dots\dots\dots (1 - 3)$$

حيث أن :

- . P : هي الحمولة أو القوة المؤثرة بالنيوتن (N) أو الباوند (P) .
- . A_o : هي مساحة المقطع الأصلي ووحدتها هي mm^2 أو in^2 .

(b) الانفعال (Strain)

يعرف الانفعال بأنه مقدار التشكل (التشوه) في المادة الأساسية المعرضة للحمولات الخارجية أو لمجرد وزنها ، ويرمز للانفعال بالرمز ϵ ، ويعبر عن الانفعال بطريقتين ، إما بمقدار التغير في الطول لوحددة الطول ، وعندها يعطى الانفعال بالعلاقة التالية :

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_o} \dots\dots\dots(2-3)$$

حيث أن :

. Δl : هو التغير في الطول (mm أو in) .

. l_o : هو الطول الأصلي (mm أو in) .

وإما بمقدار النسبة المئوية للتغير في الطول بالنسبة للطول الأصلي ، ويعبر عن الانفعال في هذه الحالة بالعلاقة التالية:

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_o} \% \dots\dots\dots(3-3)$$

ويلاحظ أن قيم الانفعال تكون موجبة في اختبارات الشد ، وسالبة في اختبارات الانضغاط .

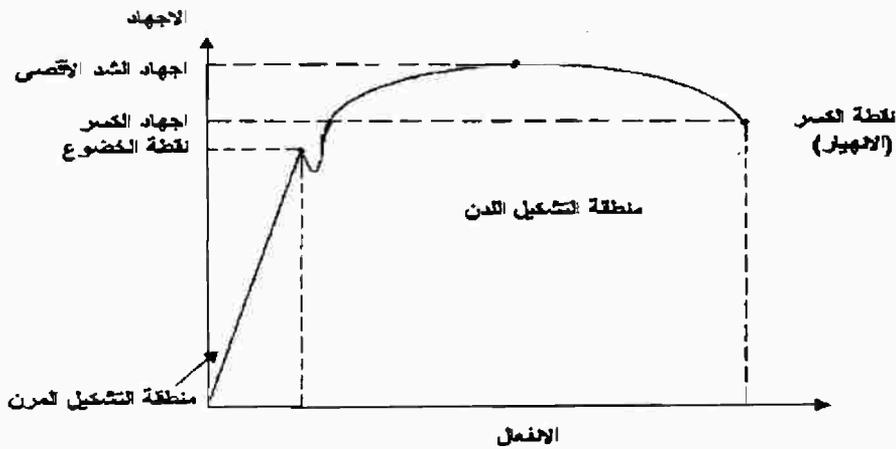
(c) الانفعال المرن (Elastic Strain)

الانفعال المرن هو الجزء الذي يمثل العلاقة الخطية بين الإجهاد والانفعال في منحنى الأجهاد - والانفعال للمادة ، ويبين الشكل (1-3) هذه العلاقة بالنسبة للمواد المطييلة . وكما هو معروف بأن المادة في منطقة الانفعال المرن يمكنها استعادة أبعادها وشكلها الأصلي بعد إزالة الحمل الخارجية المؤثر عليها . وتوجد في هذه المنطقة علاقة بين الإجهاد المؤثر والانفعال الناتج ، حيث تكون النسبة بين الإجهاد إلى الانفعال مقداراً ثابتاً . ويسمى هذا المقدار الثابت بمعامل المرونة أو معامل يونج للمرونة (Young's Modulus of Elasticity) ويمثل ذلك بالعلاقة (3-4) :

$$y = \frac{\sigma}{\epsilon} \dots\dots\dots(4-3)$$

حيث أن :

- σ : هو الإجهاد ووحدة قياسه أما (MPa) أو (psi) .
- ϵ : هو الانفعال ويقاس أما (mm/mm) أو (in/in) .
- ϵ : معامل المرونة أو ما يسمى بمعامل يونج ووحدة قياسه أما (MPa) أو (psi) .

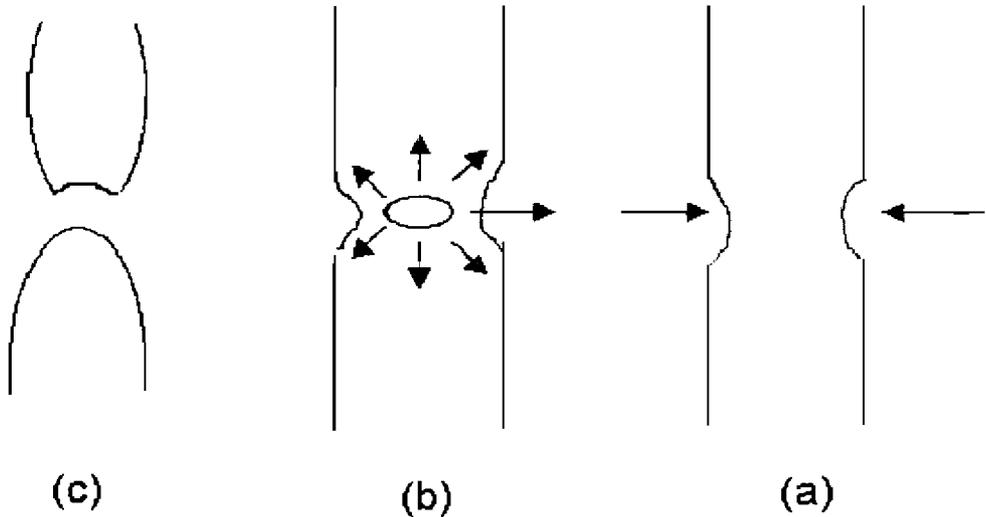


شكل (1-3)

العلاقة بين الإجهاد والانفعال للمادة المطييلة الصلدة

(d) الانفعال اللدن (Plastic Strain)

منطقة الانفعال اللدن هي المنطقة التالية للانفعال المرن في منحنى الأجهاد - والانفعال ، ونصل إليها بزيادة مقدار الحمولة الخارجية المؤثرة ، أي الإجهاد الناتج على المادة لتخطي منطقة المرونة ، وتتغير في هذه المنطقة العلاقة بين الإجهاد والانفعال لتصبح علاقة غير خطية ، وتحتفظ المادة بالتغيرات الحاصلة في الشكل أو الأبعاد بعد إزالة الحمولة الخارجية المؤثرة عليها . ويرتبط الانفعال اللدن بصغر المساحة للجزء الواقع تحت الحمل ، و يعرف هذا الجزء باسم التخصر (necking) كما مبين في الشكل (2-3) .



الشكل (2-3)

مراحل تكوين الكسر على شكل طبق وقذح

- (a) بداية تكوين العنق وتكون الإجهاد المحوري .
- (b) ظهور الكسر ، إزالة الإجهاد المحوري .
- (c) شكل كسر الطبق والقذح .

(e) نقطة الخضوع (Yield Point)

نقطة الخضوع هي النقطة التي يتم عندها التحول من الانفعال المرن إلى الانفعال اللدن . وفي واقع الأمر، فإن هذه النقطة ليست نقطة محددة ، ولكنها منطقة تمثل آخر مراحل مقاومة المادة للانفعال اللدن أي بمعنى آخر مقاومة التشكل (التشوه) . وهذه النقطة أو المنطقة مبيّنة في الشكل (1-3) ، وفي بعض الأحيان يطلق على نقطة الخضوع اسم نقطة حد المرونة (elastic limit) أو إجهاد الخضوع ، وهذه النقطة تعتبر في غاية الأهمية في التصميم والإنشاءات وكذلك في تشكيل الفلزات بشكل خاص ، حيث أنها ترمز إلى نقطة نهاية التشكيل (التشوه) المرن وبداية التشكيل اللدن .

(f) إجهاد الصمود " الاستدلال " (Proof Stress)

في بعض المواد الفلزية الطرية مثل الألمنيوم أو سبائكها ، لا تكون نقطة إجهاد الخضوع واضحة ، ولا يمكن الاستدلال عليها وتحديدتها بدقة من منحنى الإجهاد - الانفعال كما هو مبين في الشكل (3-3) ، حيث تنتقل المادة من منطقة التشكيل المرن إلى التشكيل اللدن فجأة وبدون تغير في شكل المنحنى .

ولما كانت نقطة حد المرونة مهمة في التصميم الإنشائي ، فلا بد من وجود البديل لها هو ما يعرف باسم نقطة إجهاد الصمود أو الاستدلال ، ويتم الحصول على هذه النقطة بأخذ قيمة من الانفعال مقدارها 0.2% من مجموع الانفعال الكلي للمادة حتى نقطة الكسر ، ثم يرسم خط موازي تقريبا للانفعال المرن الخطي ونقطة تقاطع هذا الخط مع منحنى الإجهاد - الانفعال وتعرف عندئذ بنقطة الصمود أو نقطة نهاية الانفعال المرن .

(g) مقاومة الشد (Tensile Strength)

وهي أقصى مقاومة المادة للحمولات الخارجية المؤثرة عليها في اتجاه الشد وتقدر مقاومة المادة بمقدار الحمولة الخارجية مقسومة على مساحة المقطع المستعرض المؤثر عليها ، أي أن لها نفس وحدات الإجهاد. إن مقاومة المادة لإجهادات الشد (خاصة تلك التي تميل للاستطالة) هي أفضل مقياس لقوة المعدن وتعرف بأنها أقصى جهد يتحمله المعدن ، ولكل معدن مقاومة شد معينة تختلف عن المعادن الأخرى ، وعادة ما تقاس بوحدات (N/mm²) وهناك عدة أنواع من مقاومة الشد وهي :

1 - أقصى مقاومة شد للمادة (Ultimate Tensile Strength)

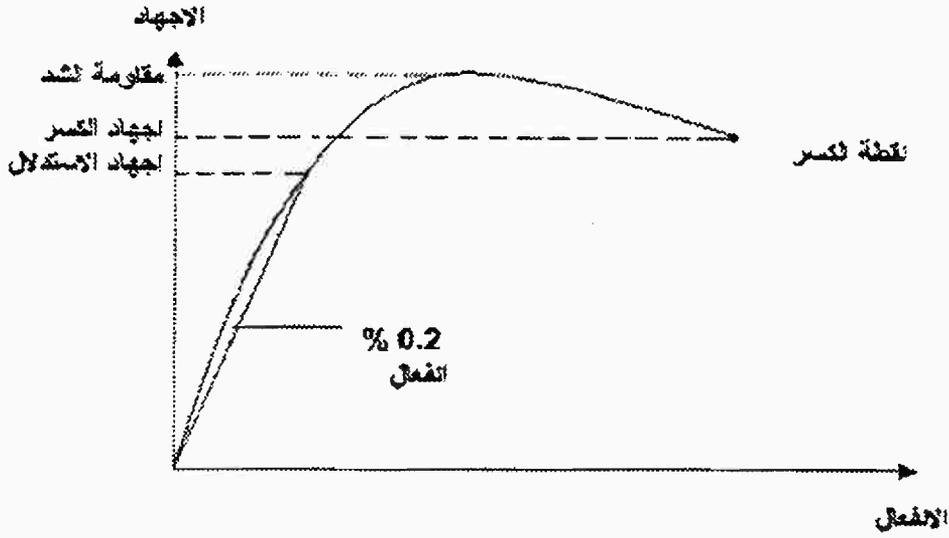
تمثل أقصى مقاومة يمكن أن تصل إليها المادة ، ونحصل عليها بقسمة الحمل الأقصى على المساحة الأصلية للعينة المختبرة وذلك من العلاقة التالية :

$$UTS = \frac{P_{max}}{A_o} \dots\dots\dots(5-3)$$

حيث أن :

- . UTS : أقصى مقاومة شد للمادة (MPa) أو (psi) .
- . P_{max} : أقصى حمل أثر على المادة (N) أو (p) .
- . A_o : مساحة مقطع العينة الأصلي (mm²) أو (in²) .

وتمثل أقصى مقاومة شد للمادة بأعلى نقطة في منحنى الإجهاد - والانفعال كما هو واضح في الشكل (1-3) .



الشكل (3-3)

منحنى الأجهاد - والانفعال للمواد المطيلة الطرية التي لا يوجد لها نقطة خضوع محددة

2 - إجهاد مقاومة الكسر (Breaking Strength)

وهو مقدار الإجهاد الذي يتم عنده كسر المادة نتيجة انهيار مقاومتها الداخلية لأية زيادة في الحمولات الخارجية . ويكون مقدار إجهاد الكسر أقل من حيث القيمة مقارنة بأقصى مقاومة شد . ونحصل على إجهاد الشد من قسمة الحمولة المؤثر في لحظة معينة على المساحة السطحية الأصلية .

$$BS = \frac{P_{breaking}}{A_o} \dots\dots\dots(6-3)$$

حيث أن :

BS : إجهاد الكسر .

$P_{breaking}$: الحمل المؤثر عند نقطة الكسر .

A_o : مساحة المقطع الأصلي للمادة .

(h) الإجهاد الحقيقي والانفعال الحقيقي (True Stress & True Strain)

إن كل من الإجهاد والانفعال المذكورين سابقا يعرفان باسم الإجهاد والانفعال الهندسي ولقد بنيت الأجهادات والانفعالات الهندسية على أساس عدم حدوث تغير في أبعاد العينة أو أي تشوه فيها ، هذا غير صحيح نظرا لأن عمليات تحميل المادة أي عند تأثير الحمولات الخارجية عليها يصاحبها نقص كبير (في حالة اختبار الشد) أو زيادة (في حالة اختبار الانضغاط) في مساحة مقطع العينة الواقعة تحسب تأثير الحمولات الخارجية ، وتقدر قيمة الإجهاد الحقيقي بقسمة الحمل المؤثر في العينة على مساحة مقطعها في لحظة تطبيق الحمل وتكون العلاقة على الصورة التالية :

$$\sigma_{true} = \frac{P}{A} \dots\dots\dots(7-3)$$

حيث أن :

σ_{true} : الإجهاد الحقيقي (MPa) أو (psi) .

P : الحمل اللحظي المؤثر .

A : مساحة المقطع عند لحظة تأثير الحمل .

أما الانفعال الحقيقي ϵ_{true} فيتم الحصول عليه بتكامل الانفعال التفاضلي (d_e) من بداية الطول الأصلي (l_o) إلى الطول النهائي (l_f) أي أن :

$$\epsilon_{true} = \int_{l_o}^{l_f} d_e = \int_{l_o}^{l_f} \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l_f}{l_o}\right) \dots\dots\dots(8-3)$$

أي أن الانفعال الحقيقي يساوي :

$$\epsilon_{true} = \ln(1 + e) \quad \dots\dots\dots(9-3)$$

حيث أن :

l_f : هو الطول النهائي ووحدة قياسه أما mm أو in .

l_o : هو الطول الأصلي ووحدة قياسه أما mm أو in .

ϵ : الانفعال الهندسي ووحدة قياسه لا بعدية وهي أما mm لكل mm أو in لكل in .

وحيث أن حجم العينة المختبرة لا يتغير تحت تأثير الأجهادات (سواء في حالة الشد أو في حالة الانضغاط) فإن :

مساحة المقطع الأصلي \times الطول الأصلي = مساحة المقطع النهائي \times الطول النهائي .
أي أن :

$$A_o l_o = A_f l_f \quad \dots\dots\dots(10-3)$$

$$\text{or} \quad \frac{l_f}{l_o} = \frac{A_o}{A_f} \quad \dots\dots\dots(11-3)$$

(الطول النهائي / الطول الأصلي) = (مساحة المقطع الأصلية / مساحة المقطع النهائية)
ويمكن التعبير عن قيمة الانفعال الحقيقي بالشكل التالي :

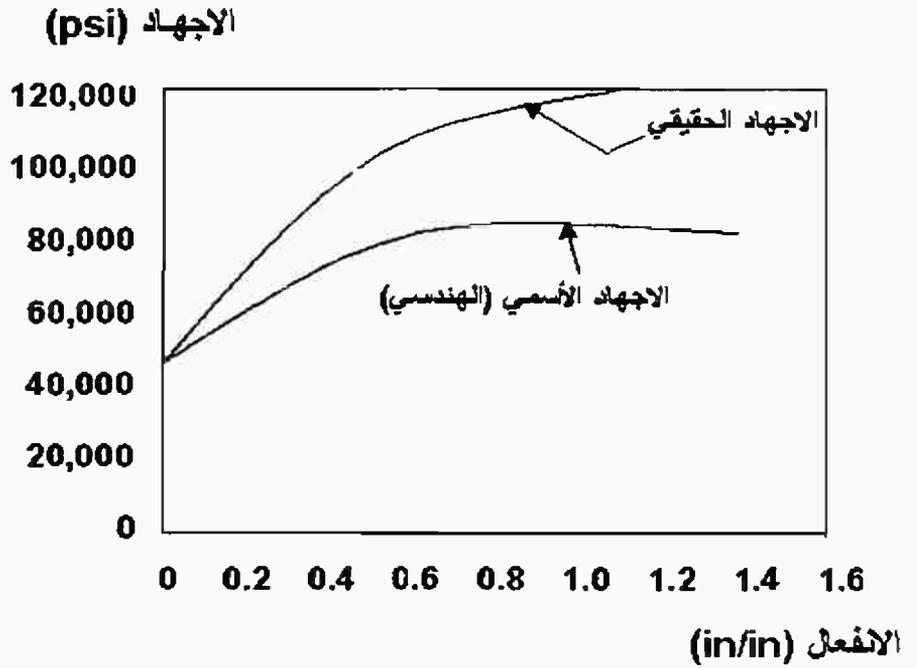
$$\epsilon_{true} = \ln \frac{A_o}{A} \quad \dots\dots\dots(12-3)$$

حيث أن :

A_o : مساحة المقطع الأصلية (mm^2) أو (in^2) .

A : المساحة اللحظية لمقطع العينة (mm^2) أو (in^2) .

ويوضح الشكل (3-4) العلاقة بين الإجهاد والانفعال في حالتَي الإجهاد الهندسي والإجهاد الحقيقي لعينة من النحاس عديدة البلورات . ويتوجب هنا ذكر بعض النقاط المهمة المرتبطة بالإجهاد والانفعال الحقيقيين :



شكل (3 - 4)

العلاقة بين الإجهاد والانفعال للنحاس

1- مقدار الإجهاد الحقيقي أكبر من مقدار الإجهاد الهندسي في اختبار الشد ، وهذا أمر متوقع حيث تقل مساحة مقطع العينة نتيجة التخصر الحادث أثناء عملية الشد .

2- تتعكس الحقيقة السابقة في ظروف اختبار الانضغاط ، حيث يكون مقدار الإجهاد الحقيقي أقل من مقدار الإجهاد الهندسي وذلك نظرا لزيادة مقطع العينة الناشئ عن الانضغاط .

3- مقدار الانفعال الحقيقي يكون متساويا في حالي اختبار الشد وكذلك الانضغاط لنفس مقدار التغير في الطول ، ولو كانت الإشارة مختلفة فهي موجبة في حالة اختبار الشد ، وسالبة في حالة اختبار الانضغاط .

4- تستخدم قيمة الإجهاد الهندسي في وضع المواصفات الهندسية ، وفي تصميم الإنشاءات ، بينما يستخدم الإجهاد الحقيقي عند تشكيل المواد الفلزية للتعرف على القيمة الفعلية للتشكيل (التشوه) الحادث في المادة .

5- إن علاقة الإجهاد - والانفعال الهندسي أكثر استخداما في الأغراض العملية ، والعكس صحيح في حالة البحوث العلمية حيث تكون علاقة الإجهاد - والانفعال الحقيقيين أكثر استعمالا .

(h) الأشكال الحقيقية لمنحنيات الإجهاد - الانفعال

تقسم المواد الهندسية طبقا لشكل منحنى الإجهاد - والانفعال إلى أربع مجموعات رئيسية :

1- مواد مطيلة صلدة (Hard Ductile Materials) .

وهذه المواد يظهر في منحنياتها بوضوح كل من التشكيل المرن واللدن ، كما تظهر فيها بوضوح نقطة (منطقة) الخضوع . ومن أشهر الأمثلة على هذا النوع من المواد الحديد الطري الذي تصل فيه نسبة الكربون إلى 0.3% .

2- مواد مطيلة طرية (Soft Ductile Materials) .

تظهر في منحنيات الإجهاد - الانفعال لهذه المواد كل من منطقتي التشكيل المرن واللدن ، ولكن لا يوجد حد أو نقطة فاصلة بين هاتين المنطقتين . ومن أمثلة ذلك فلز الألمنيوم وسبائكه . ولما كان إجهاد الخضوع " نقطة الخضوع " مهماً في التصميم الميكانيكي ، فإنه يستعاض عنه بإجهاد الصمود " الاستدلال " كما سبق توضيحه .

3 - مواد قصفة أو زائلة سريعة الانكسار (Brittle Materials) وتظهر في منحنى الإجهاد - والانفعال لهذه المواد ، منطقة التشكيل المرن فقط وتتهار المادة في هذه المنطقة دون الوصول إلى منطقة التشكيل اللدن . ومن أمثلة المواد القصفة ، معظم المواد السيراميكية " الخزفية " والخرسانة وبعض المواد الفلزية مثل حديد الزهر والفولاذ عالي المقاومة .

4 - مواد عالية اللدونة (Super plastic materials) في هذه المجموعة ، يزيد الانفعال المرن بكثير عن 100% وكما هو واضح في الشكل (3-5) ، فإن الانفعال يزداد بزيادة الإجهاد ولكن لا يمكن اعتبار ذلك تشكيلاً لنا حيث تعود المادة إلى وضعها وأبعادها الأصلية بمجرد إزالة الحمل المؤثر عليها ، ومن أشهر أمثلة المواد عالية اللدونة المطاط والمواد البلاستيكية بصورة عامة .

(i) مقاومة الخضوع (Yielding Strength)

وتعرف مقاومة الخضوع بأنها قابلية المادة على مقاومة الانحناء والتطويع ، وهي دالة تعتمد على الموديل اللدائني للمعدن أو ما يعرف بـ " معامل يونج " وتقاس أيضا بوحدات (N/m^2) .

(j) المطيلية (Ductility)

هي مقدار التشكل اللدن الذي يتم في المادة حتى نقطة الكسر ، أو بتعبير آخر هي مقدار قابلية المادة للتشكيل اللدن قبل كسرها. ويمكن التعبير عن مطيلية المادة بإحدى طريقتين وهما :

1- النسبة المئوية للاستطالة (Percentage Elongation)

ويرمز لها بالرمز (El%) وتقاس بمقدار التغير في الطول منسوبا إلى الطول الأصلي .

$$\text{المطيلية} = \frac{\text{الطول النهائي} - \text{الطول الأصلي}}{\text{الطول الأصلي}} \times 100$$

أو :

$$Ductility = \frac{\Delta L}{l_o} = \frac{l_f - l_o}{l_o} \times 100 \dots \dots \dots (13-3)$$

حيث أن :

l_o : الطول الأصلي ووحدة قياسه هو (mm) أو (in) .

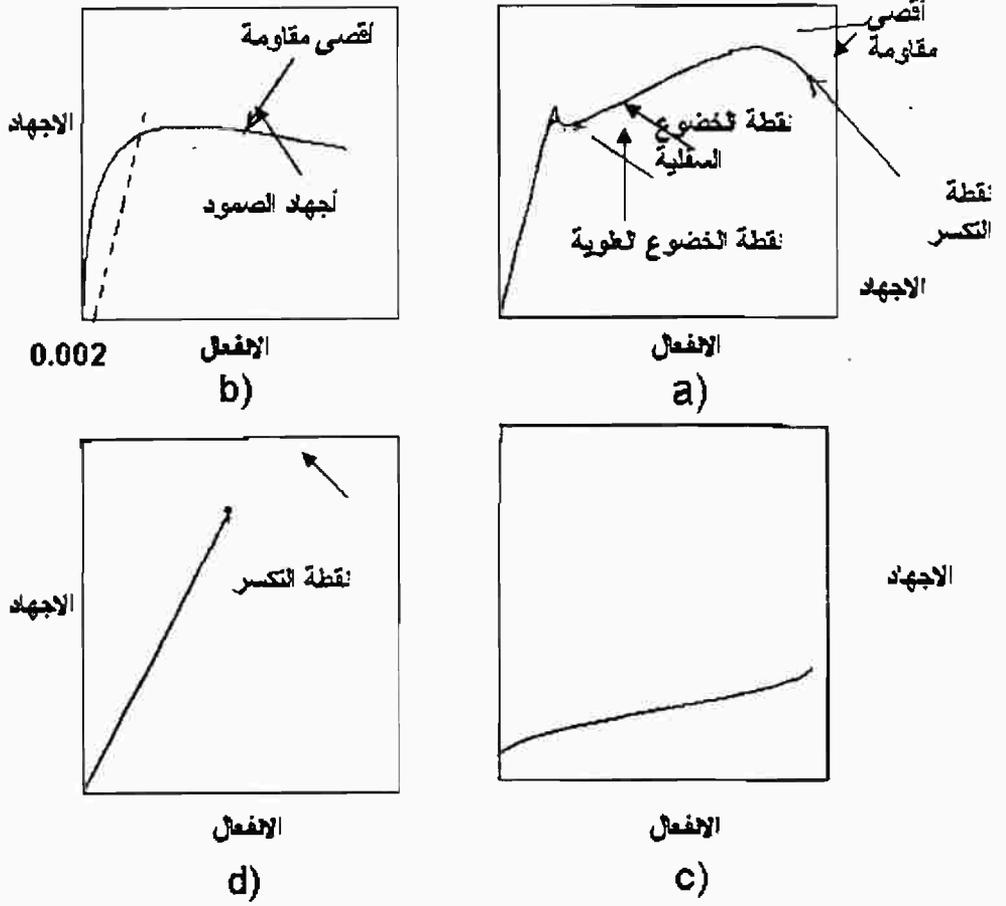
l_f : الطول النهائي (mm) أو (in) .

ΔL : مقدار التغير في الطول .

أي أن الاستطالة تساوي :

$$\Delta L = l_f - l_o$$

ونظرا لأن مقدار الاستطالة يعتمد على طول العينة ، ولغرض التوحيد القياسي فلا بد من أخذ عينات قياسية من المادة عند اختبارها وهذه العينات تكون إما طويلة 25cm أو قصيرة 5cm .



الشكل (5-3)

الأشكال المختلفة لمنحنيات علاقة الإجهاد - الانفعال

- (a) مواد مطيلة صلدة ذات نقطة خضوع واضحة مثل الفولاذ منخفض الكربون .
- (b) مواد مطيلة طرية ليس لها نقطة خضوع ويستعاض عنها بإجهاد الصمود .
- (c) مواد عالية المرونة كالبلستيك .
- (d) المواد القصيفة ويتم كسرها في منطقة اللدونة مثل حديد الزهر .

2- النسبة المئوية للاختزال في المساحة السطحية

(Percentage Reduction in Surface Area)

ويرمز لها بالرمز (RA%) ويعبر عنها حسب العلاقة التالية :

$$\text{المطيلية} = \frac{\text{مساحة المقطع قبل الاختبار} - \text{مساحة المقطع عند الكسر}}{\text{مساحة المقطع قبل الاختبار}} \times 100$$

أو :

$$\text{Ductility} = \frac{A_o - A_f}{A_o} \times 100 \dots\dots\dots(14-3)$$

حيث أن :

A_o : هي مساحة مقطع المادة قبل الاختبار mm^2 أو in^2 .

A_f : مساحة مقطع المادة عند الكسر أي عند الانهيار mm^2 أو in^2 .

وتعد طريقة الاختزال في مساحة المقطع أفضل لقياس المطيلية من الطريقة السابقة ، ويحبذ استخدامها أكثر من طريقة النسبة المئوية .

(k) الانضغاط (Compression)

أن اختبار الانضغاط وطريقة إجرائه يشبه إلى حد كبير اختبار الشد ، ولكن الاختلاف بينهما هو في شكل العينة واتجاه التحميل . حيث إن عينة اختبار الانضغاط تكون أطول ، كما يكون التحميل في اتجاهين متضادين ، بينما تكون الحمولة في حالة الشد في اتجاهين متقابلين ، والمعلومة الوحيدة التي يمكن الحصول عليها من منحنى علاقة الإجهاد - والانفعال في حالة اختبار الانضغاط هو مقدار إجهاد الخضوع للانضغاط ، والذي يشبه إجهاد الخضوع في اختبار الشد .

وينطبق على الانضغاط ما سبق ذكره بالنسبة لاختبارات الشد . ويبين الشكل (6-3) منحنيات الانضغاط لعدد من المواد الفلزية .

(1) الصلابة (Toughness)

تعرف الصلابة على أنها مقدار الطاقة اللازمة لكسر العينة أو " مقدار الشغل لوحدة الحجم الذي يلزم لكسر العينة " . إن الصلابة هي إحدى الحالات الفيزيائية الثلاثة للمادة والتي تتميز بخاصية التماسك ، ويمكن تعريفها أيضا بأنها مقاومة المادة للاستهلاك . حيث عادة ما تستعيد المواد الصلبة شكلها إذا لم تتعرض لأي تشوه نتيجة تأثير قوى خارجية ، وتتميز المواد الصلبة الحقيقية بنقطة انصهار محددة وتكون بلورية ، حيث تتماسك جزيئاتها في نمط معين بواسطة قوى بينية جزيئية أقوى من تلك الموجودة بين جزيئات الحالات الأخرى . ويمكن التعبير عن الصلابة بالعلاقة التالية :

الشغل = \int (الحمل) (مقدار تفاضلي من الاستطالة)

أي أن :

$$\text{Work} = \int (\text{force}, p)(\text{increment of extension}, dl) \dots \dots \dots (15-3)$$

$$\text{Work per unit volume} = \int \frac{p \, dl}{Al} = \int_{\epsilon}^{\epsilon_f} \sigma \, d\epsilon$$

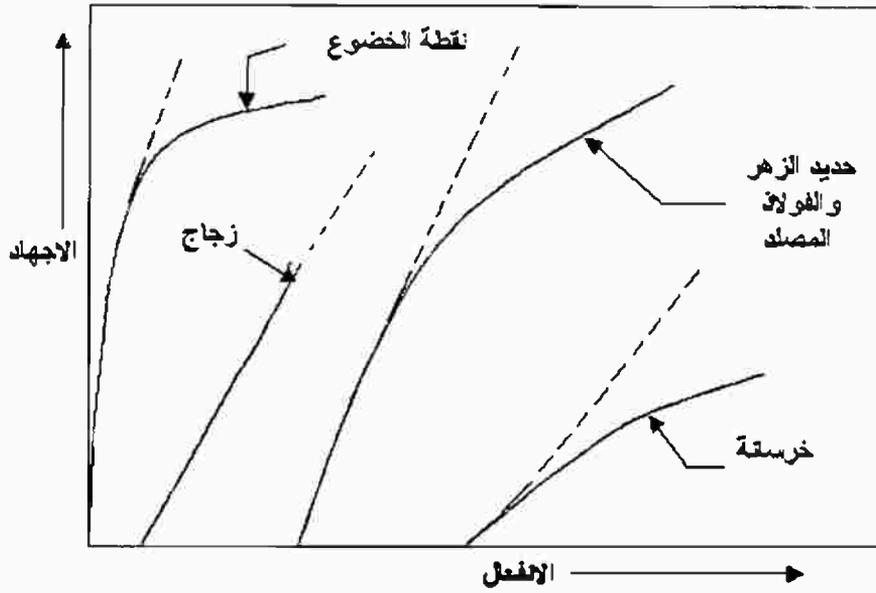
حيث أن :

A : هي مساحة المقطع ووحدة قياسها هي mm^2 أو in^2 .

ϵ_f : مقدار انفعال الكسر (mm/mm) أو (in/in) .

σ : هو الإجهاد الهندسي المؤثر ووحدة قياسه أما (N/mm^2) أو (p/in^2) .

ϵ : الانفعال الهندسي .



الشكل (6-3)

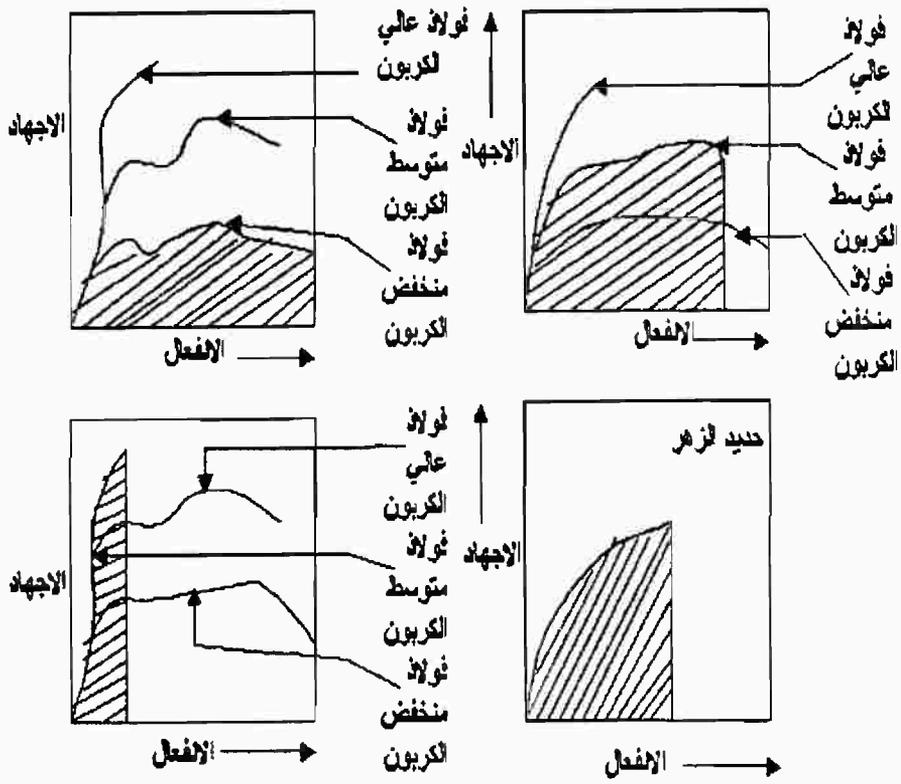
منحنى الأجهاد - والانفعال لاختبارات الانضغاط لعدة مواد
 • الخطوط المنقطه تعبر عن المرونة

ويمكن تقدير مقدار الطاقة اللازمة للكسر بحساب المساحة تحت منحنى العلاقة بين الإجهاد - والانفعال ، ويلاحظ أن صلابة المواد ترتبط دائماً بمقدار كل من المقاومة والمطيلية على النحو التالي :

- 1- إن المواد عالية الصلابة تكون ذات مقاومة ومطيلية عاليتين .
- 2- المواد عالية المقاومة ومنخفضة المطيلية ليست جيدة الصلابة حيث تتعرض للكسر عند أقل قدر من الصدمات .

3 - ترتبط الصلابة بمقاومة المادة للصدمات والأحمال الفجائية .

4 - تحسب مقدار الصلابة من حساب المساحة تحت منحنى الإجهاد - والانفعال ، وهي المساحة المظللة في الشكل (7-3) .



الشكل (7-3)

صلابة المواد المختلفة معبراً عنها بالمساحة تحت منحنى الأجهاد - والانفعال

(m) الصلادة (Hardness)

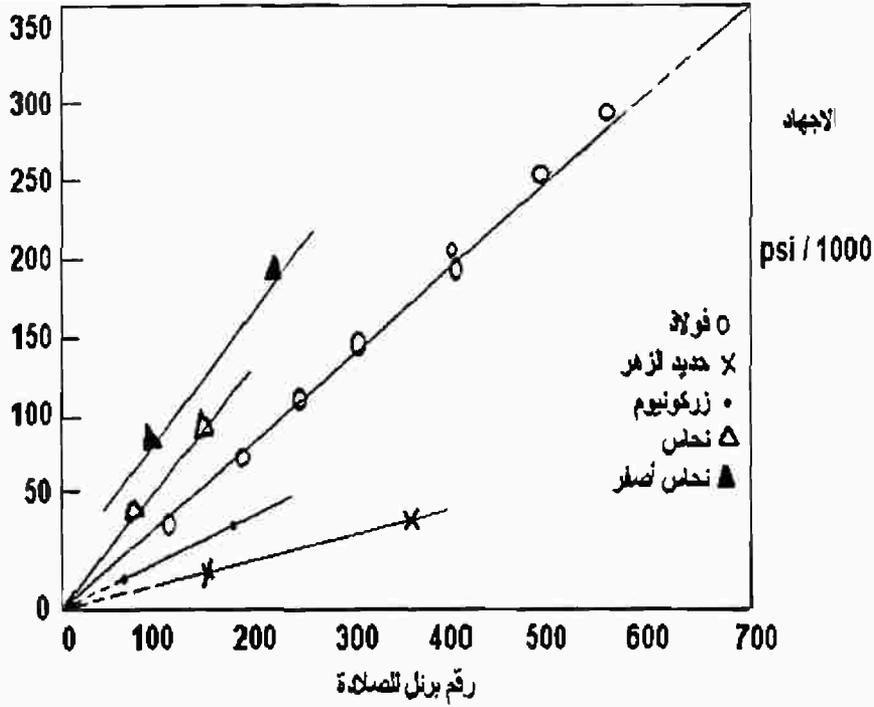
تعرف الصلادة من خلال عدة تعاريف ، حيث أنه لا يوجد هناك تعريف واحد محدد ومتفق عليه للصلادة . ويرجع ذلك إلى حقيقة إن استخدامات الصلادة التجارية لا تقيس خاصية ميكانيكية متأصلة في المادة ، ولكنها اختبار اختياري لقياس تصرفات المادة عند ظروف معينة ، وإن كان هناك تعريف يمكن وضعه فهو " الصلادة هي مقدار مقاومة المادة للتشكيل أو الخدش أو الحك أو وضع علامة عليها " والتعريف الآخر الأكثر شيوعاً للصلادة هو أنها مقاومة المادة للاختراق بمادة أخرى ، ويمكن تعريفها أيضاً بأنها مقاومة المادة للخدش أو التلقيم بتأثير ضربة أو حمولة مثبتة .

إن مقاومة الخدش تقاس وفق سلم موس وهو سلم وضعه فريدريك موس (1773-1839) ، والذي أختار عشرة معادن كنقاط مرجعية بدءا من الطلق (Talc) الذي صلادته 1 إلى الماس (Diamond) الذي صلادته 10 ويستخدم حاليا سلم موس المعدل مضافا إليه 9 معادن أخرى كنقاط مرجعية و تقاس مقاومة التثليم وفق سلم أخرى مثل برينل وروكول وفايكرز وغيرها .

وبالرغم من أن الاختبارات الميكانيكية لقياس صلادة المادة هي اختبارات تجريبية لا ترتبط بمبادئ أساسية ، ألا أنها تؤدي دورا مهما وأساسيا في الصناعة . وتستخدم طرق الاختبار المختلفة لقياس صلادة المواد الفلزية كأحد طرق فحص المواد للكشف عن أي عيوب أو اختلاف فيها عن المواصفات الموضوعه ، وبطبيعة الحال فإن هذا الاختبار يصلح فقط للسطح الخارجي ولا يمكن من خلاله التعرف على أية عيوب داخلية في المادة .

ويمكن القول أن قطعتين من الفلز لهما نفس الصلادة يمكن أن تكونا من المادة نفسها أو من مادتين مختلفتين ولكن إذا كانت قيمة الصلادة مختلفة ، فلا بد أن القطعتين هما لمادتين مختلفتين . ولا توجد نظريات معينة تربط العلاقة بين الصلادة والخواص الميكانيكية الأخرى ، ولكن هناك بعض العلاقات التقريبية والتجريبية التي يتم من خلالها ربط صلادة المادة بخواصها الميكانيكية الأخرى .

من أهم الخواص التي يمكن ربطها بالصلادة هي أقصى مقاومة شد في المادة ، كما هو مبين في الشكل (3-8) ، والذي يوضح العلاقة التقريبية بين الصلادة ومقاومة الشد لكل من الفولاذ والنحاس الأصفر وحديد الزهر . وربما يرجح وجود مثل هذه العلاقة إلى الارتباط بين كل من مقاومة شد المادة والصلادة بالتشكيل اللدن لها .



الشكل (8-3)

العلاقة التقريبية بين الصلادة ومقاومة الشد " الأجهاد " لبعض الفلزات والسبائك

(n) الزحف (Creep)

يعرف الزحف بأنه التشكل (التشوه) اللدن الذي يحدث في المادة بتأثير الزمن عند درجات الحرارة العالية نتيجة الأجهادات المرنة الواقعة والمؤثرة عليها . أو هو التغيير في الشكل ، أو تمدد المعدن تحت تأثير أي إجهاد أو قوة خارجية لفترة طويلة من الزمن عند التعرض لدرجات حرارة عالية لبعض المواد مثل الرصاص والقصدير . فعندما يؤثر إجهاد ثابت مقداره σ على مادة ما لفترة زمنية طويلة عند درجة حرارة عالية ، حتى لو كانت بمقدار نصف درجة أعلى من درجة الانصهار ، فإن المادة سوف تتشكل تشكلا لدنا بغض النظر عن مقدار الإجهاد المؤثر حتى وإن كان أقل من إجهاد

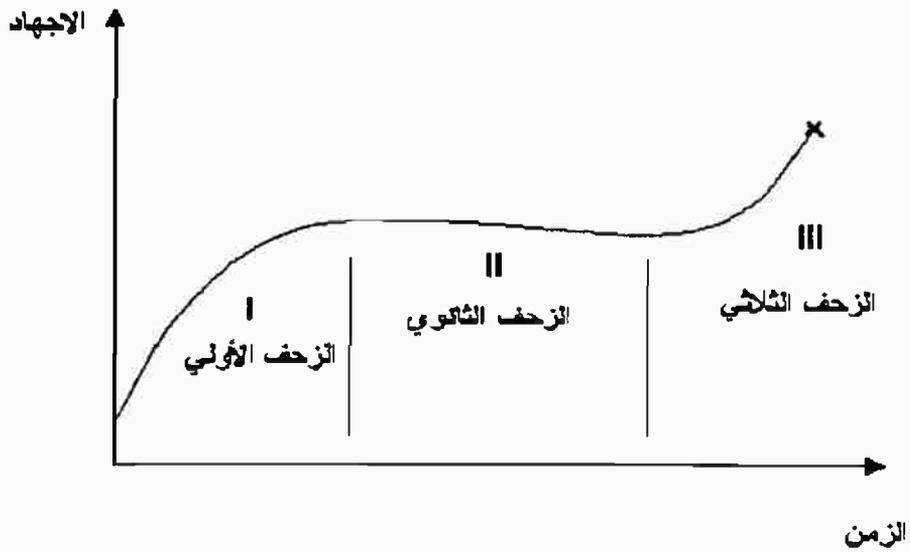
الخصوع . ومن مظاهر الزحف ، الاستطالة ، اللدونة ونقص مساحة المقطع المستعرض بالقرب من منطقة الكسر في اختبار الشد للمعادن القابلة للمطاولة . ويعد الزحف أحد أهم الخواص الميكانيكية التي يتم على أساسها اختيار المادة المناسبة للاستخدام عند درجات الحرارة العالية . على سبيل المثال ، يمكن أن يؤدي التشكيل الحاصل عند درجات الحرارة العالية . على سبيل لزعانف التوربينات الغازية المستخدمة في الطائرات النفاثة والتغير في الأبعاد إلى احتكاك زعانف التوربينات بجسم التوربين وينتج عن ذلك ثني الزعانف أو كسرها . مثال آخر ، في المفاعلات النووية ، تؤدي النسبة البسيطة من التشكيل الناتج عن الزحف في المادة المغلفة للوقود النووي إلى فشلها وكسرها ، وينتج عن ذلك تجميع المادة المشعة في أجهزة التبريد المحيطة بالوقود النووي .

ولخطورة أثر الزحف على المواد ، يجب الأخذ بنظر الاعتبار عند تصميم المعدات والأجهزة العاملة عند درجات الحرارة العالية خاصة الزحف ، وكيفية تصرف المادة عند درجات الحرارة العالية في محاولة لتجنب الآثار الناجمة عنها .

ويبين الشكل(3-9) العلاقة بين الإجهاد المؤثر والزمن ، أي منحنى الزحف لمادة متعددة البلورات (polycrystalline) الواقعة تحت تأثير هذا الإجهاد مولدة قدرا صغيرا من الانفعال (ϵ) . ويلاحظ أنه يمكن تقسيم المنحنى إلى ثلاث مراحل مختلفة :

- 1- المرحلة الأولى : ويكون فيها معدل الزحف أي ميل منحنى الانفعال-الزمن صغيرا ، كما أنه مقدار ثابت لا يتأثر ولا يتغير مع الزمن .
- 2- المرحلة الثانية : يزيد معدل الزحف خلال هذه المرحلة مع الزمن .

3 - ترتبط هذه المرحلة بالزيادة السريعة في معدل الزحف لغاية تكسر المادة . وترتبط الزيادة في معدل الزحف مع صغر مساحة السطح ولن يؤثر نقصان الحمولة الخارجية (أي مقدار الإجهاد) على معدل الزحف السريع خلال هذه المرحلة ولذلك لن يقل معدل الزحف عن القيمة التي وصل إليه .



الشكل (3-9)

تمثيل تخطيطي لمنحنى الزحف مبيناً المراحل الثلاث

ويلاحظ من مقاومة المادة للزحف ما يلي :

أولاً: يزداد معدل الزحف مع زيادة درجة الحرارة المؤثرة على المادة .

ثانياً: يزداد معدل الزحف بزيادة مقدار الإجهاد الخارجي المؤثر على المادة .

ثالثاً: يزداد مقدار الاستطالة (التغير في الأبعاد) في المادة عند الكسر بزيادة مقدار الإجهاد المؤثر .

رابعاً: تقل الزيادة في درجة الحرارة وكذلك زيادة الإجهاد (معدل الزحف) المؤثر بشكل واضح على عمر المادة حتى حدوث انهيارها .

(o) الكلال والتعب (Fatigue)

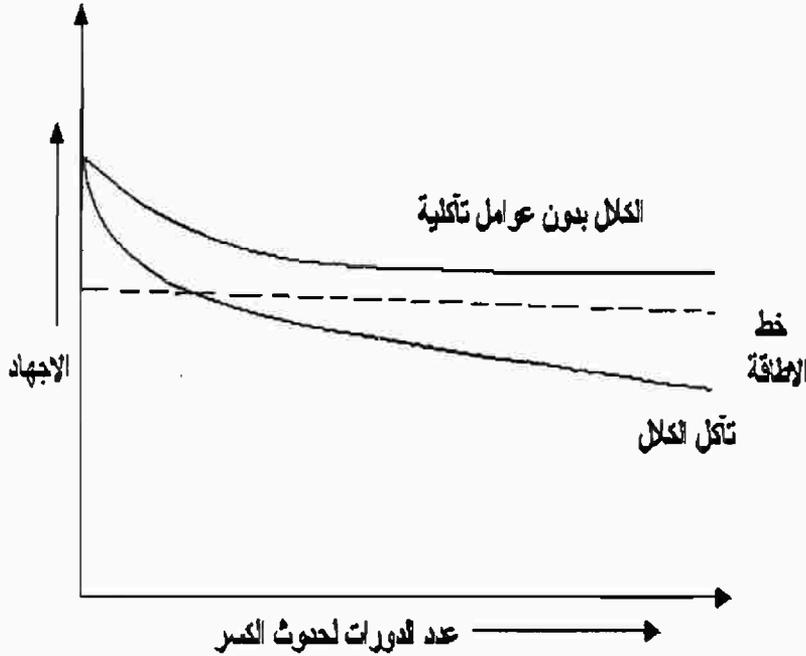
يمكن للمادة تحمل ومقاومة الأحمال الخارجية لفترة طويلة ، ولكنها قد تنهار فجأة بعد فقدانها القدرة على التحمل ، ولهذا يعرف انهيار الكلال بأنه الانهيار الناتج عن إجهاد المادة وعدم قدرتها على التحمل أكثر من ذلك . وتختلف مقاومة المادة حسب الأجهادات فنقل مقاومة المادة إذا كانت مترددة وليست إجهادات ثابتة وغالبا ، فإن الأجهادات المؤثرة في حالة الكلال هي إجهادات دورية .

ويعرف الكلال أيضا بأنه مقاومة المادة للانهيار نتيجة تعرضها للإجهادات المترددة دوريا ونقصان كفاءة المادة ذات الإشعاع الضوئي نتيجة إثارته ، أو كما تم تعريفه في الباب الأول بأنه تكسر المواد المعرضة إلى أحمال متكررة تحت تأثير إجهادات أقل بكثير من المقاومة القصوى لها . ويظهر عادة في المعادن التي لها علاقة بالتحميل الدوراني أي المعدات الدوارة مثل المضخات والضاغطات .

وعند انهيار المادة تحت ظروف الاستخدام المشار إليها أعلاه ، يظهر في ملامح الكسر عندئذ كل من الانهيار القصيف ، والانهيار المرن . ومن أشهر الأمثلة على كسر المادة بتأثير الكلال عمود الإدارة المتردد ، وتوربينات القوى ، وبعض الأجزاء الميكانيكية الأخرى بعد العمل لفترات طويلة .

ولقياس مدى تحمل المادة لإجهادات الكلال يؤخذ إجهاد الخضوع كقياس لقدرة المادة على التحمل ، ويتم قياس عدد الدورات التي يمكن أن تتحملها المادة دون حدوث أي أثر ثابت " تشكيل لدن " في هذه المادة .

ويتوقف حد الكلال على الوسط المحيط به والظروف التي تعمل وتستخدم فيها المادة ، ففي وجود الأحماض وأوساط التآكل يقل حد الإطاقة كثيرا عن الظروف العادية الأخرى . وهذا ما يبينه الشكل (11-3) .



الشكل (11-3)

تأثير عوامل التآكل على أجهادات الكلال للفلزات

3.3 تأثير درجة الحرارة على الخواص الميكانيكية

(Effect Of Temperature on Mechanical Properties)

من المعروف أنه عند زيادة درجات الحرارة تقل مقاومة المعدن للشد وكذلك مقاومة الخضوع ، وكمثال على ذلك فإن مقاومة الشد للفولاذ المقاوم والذي لا تزيد نسبة الكربون فيه عن 0.25 هي 450 N/m^2 عند درجة حرارة 25 درجة مئوية وتقل إلى قيمة 210 N/m^2 عند درجة حرارة 50 درجة مئوية .

4.3 التآكل (Corrosion)

في هذا البند يكن الإشارة إلى أحد الأنواع المهمة للتآكل وهو التآكل المنتظم الذي يعني ضياع كتلة المعدن بشكل منتظم دون حدوث نقر أو أشكال تدل على حدوث مهاجمة موقعية ، ومن أنواع التآكل الأخرى الجلفاني والنقري والداخلي الحبيبي والجهدي والفرضي . وسيتم التطرق الى موضوع التآكل بشكل تفصيلي في الباب الرابع من هذا الكتاب .

5.3 الاختبارات الميكانيكية (Mechanical Tests)

تعد الاختبارات الميكانيكية من أقدم الطرق المستخدمة للتعرف على خواص المواد ، إذ أنها طبقت بعد التعرف على قانون هوك ، والذي وضع في القرن السابع عشر وكان الأساس والقاعدة لعدد كبير من الخواص الميكانيكية. ثم كانت الثورة الصناعية بعد ذلك والتي كان من نتائجها التوصل إلى الاختبارات الميكانيكية التي تجرى للمادة لتحديد مواصفاتها .

في الوقت الحاضر ومع ازدياد عجلة التطور لوسائل الحياة ، خاصة في وسائل النقل الجوي ، وتوصيل اليابسة بالجسور الضخمة ، واستخدام السفن والبواخر الكبيرة في البحار والمحيطات وازدياد المعروض من الفلزات على شكل سبائك الأمر الذي أملى على المهندس المصمم تحديد ووصف خواص المادة بشكل دقيق ، وحتى يكون المهندس المصمم على بينة من أمره في اختيار المادة المناسبة ، ومع التوسع الكبير في استخدام المفاعلات النووية والاهتمام بالأمان النووي ، دعت الحاجة إلى مواد ومركبات جديدة لتناسب ظروف العمل في تلك المفاعلات وغيرها .

وعلى الرغم من أن اختبارات المواد كانت وما زالت أمور روتينية إلا أنه يلاحظ من خلالها ما يلي :

1. الاهتمام بتفسير واضح لنتائج اختبارات المواد وخاصة علاقة تلك الخواص كما ، ومدى ملاءمتها للأغراض المصنعة من أجلها .
2. إن معظم الاختبارات الميكانيكية المتداولة الآن تعطي نتائج مقبولة من حيث النوعية .
3. تساعد هذه الاختبارات في تقديرات الخواص وبالتالي التعرف على مدى مطابقتها للمواصفات المطلوبة للتصميم .
4. تعتبر هذه الاختبارات مهمة لمراجعة مدى مطابقة المادة المستوردة للمواصفات التي وضعت من قبل المستورد أو المصمم . ويجب أن يراعى في هذه الاختبارات خاصة بالنسبة للبند الرابع ما يلي :
 - (a) وضع مواصفات عامة للعينات المختبرة .
 - (b) اختيار عينات ممثلة للمادة أو المواد المطلوب اختبارها .
 - (c) إجراء الاختبار عدة مرات لمراعاة الدقة ولمعرفة مقدار الدقة في النتائج ومن ثم أخذ المتوسط الإحصائي لتلك النتائج .
 - (d) بيان مواصفات الأجهزة والمعدات المستخدمة لإجراء الاختبارات وطرق القياس نظرا لاختلاف النتائج تبعا للأجهزة أو الطريقة المستعملة في قياس معين .
 - (e) اقتصاديات الاختبار ، حيث ينبغي أن تكون الاختبارات الوتيرية أي الروتينية غير مكلفة ولا تتطلب مهارات عالية .
 - (f) لا بد من توضيح طريقة الاختبار بشكل أكثر تفصيلا حتى لو تم إعادة الاختبار مرة أخرى سواء للشخص المختبر أو للآخرين بحيث يعطي الاختبار النتائج نفسها .
 - (g) يجب أن تكون الاختبارات سريعة ولا تستغرق وقتا طويلا .
 - (h) يفضل إجراء بعض الاختبارات في موقع العمل وأن لا تحتاج إلى تجهيزات خاصة .

ولكي يتم ضمان نتائج الاختبارات فلا بد من ضرورة توحيد الأجهزة المستخدمة وطرق القياس المستعملة ومواصفات العينة المقاسة وما شابه ذلك ولقد وضعت الجمعية الأمريكية للاختبارات والمواد A.S.T.M أي (American Society For Testing and Materials) ، وكذلك مؤسسة المقاييس البريطانية (British Standards Institution) BSI وهيئة المواصفات والمقاييس الألمانية DIN وكذلك هيئة المواصفات والمقاييس السعودية SASO مواصفات قياسية للاختبارات الميكانيكية .

ولسوء الحظ فقد حصل تباين واضح بين هذه المواصفات ، حيث يوجد اختلافات في بعض تلك المواصفات ومع ذلك يميل التوجه العالمي الآن إلى التوحيد القياسي للحد من تلك الاختلافات . ومن أهم الاختبارات الميكانيكية التي تجرى على المواد والتي سوف يتم التعرض لها في هذا الباب هي الاختبارات التالية :

1. اختبارات الشد والانضغاط .
2. اختبار الصلادة .
3. اختبار مقاومة الصدمات .
4. اختبار الانحناء .
5. اختبار الكلال وحد الإطاقة .
6. اختبار الزحف والخواص الميكانيكية عند درجات الحرارة العالية .

6.3 أنواع الاختبارات وأهدافها (Tests Types & Purposes)

اشرنا سابقا إن الهدف من إجراء الاختبار على المادة هو التأكد من مطابقتها للمواصفات سواء خلال مراحل الإنتاج أو مراحل الاستخدام العملي . ومن أهم أنواع تلك الاختبارات المذكورة أعلاه هي الاختبارات التالية :

1.6.3 اختبارات وتيرية روتينية (Routine Tests)

إن العديد من الاختبارات المعملية تجرى في الصناعة بشكل دوري ويطلق عليها اختبارات وتيرية أو روتينية وتهدف هذه الاختبارات إلى الكشف على المواد المنتجة أو الداخلة في التصنيع ، وذلك للتأكد من مطابقتها لمواصفات المواد الداخلة في التصنيع أو المنتجة من التصنيع ، أو للتأكد من خواص المواد ومدى ملائمتها لطرق التصنيع المختلفة . وبهذا يتم التأكد من قبل كل من المشتري والمصنع أن إنتاجه مطابق للمواصفات الموضوعية ، وهي مهمة أيضا للمصنع حتى يتأكد من أن المواد الأولية التي استخدمت في التصنيع هي مناسبة للتطبيق .

2.6.3 اختبارات استكشافية (Exploratory Tests)

وهي تعد العمود الفقري في بحوث خواص المواد وتهدف هذه الاختبارات إلى :

(a) توسيع قابلية الإدراك وإضافة الكثير من المعلومات والبيانات إلى ما هو موجود بالفعل عن بعض المواد التجارية والصناعية .

(b) تقدير خواص المركبات الجديدة سواء اكتشفت أو صنعت حديثا .

(c) يمكن إجراء اختبار استكشافي معين لتقدير مدى كفاءة طرق اختبار جديدة وفعاليتها كي تستعمل بعد ذلك كطريقة اختبار وتيري .

وفي معظم الأحيان تؤدي نتائج تلك الاختبارات إلى تعديل في طرق الاختبار المتبعة ، منذ زمن طويل أو إحلال طريقة جديدة بدلا من الطرق القديمة المستخدمة . وتحتاج الاختبارات الاستكشافية إلى مهارة أعلى وتدريب أفضل للعاملين والقائمين بأمرها ، مقارنة بالاختبارات القديمة الوتيرية ، كما

أنها تحتاج إلى أجهزة ومعدات خاصة ذات درجة عالية من الدقة تجهز بها المصانع الكبيرة أو جهات الأبحاث المهمة باكتشاف المواد وتطويرها .

3.6.3 اختبارات متلفة (Destructive Tests)

ينتج عنها تحطيم جزء من المادة قيد الاختبار جزئيا أو كليا ، ولذلك فإن هذه الاختبارات تعاني من قصور واضح يمكن تلخيصه بالشكل التالي :

- (a) لا يمكن استخدامها لفحص منتج نهائي أو أجزاء منه .
- (b) يقتصر استخدامها فقط لاختبار عينات صغيرة من المادة ، أي جزء من المنتج وليس كله ولهذا فإنها لا تعطي دلالة واضحة في أغلب الأحيان عن مواصفات المنتج .

تستخدم الاختبارات المتلفة أساسا كأحد أنواع الاختبارات الوتيرية في المصانع ، وذلك للتأكد من مطابقة المواد للمواصفات أو التغيرات التي تحدث فيها أثناء خطوات التصنيع ومراحلها المختلفة . وتجرى الاختبارات المتلفة على عينات صغيرة معدة خصيصا لهذا الغرض طبقا للمواصفات المناسبة أو الخاصة بكل مصنع . وعندما يكون المطلوب التأكد من نوعية المادة المستخدمة وخواصها في منشأ كبير أو جهاز ضخيم ، فإن الاختبار يجري على نموذج تمثيلي له مصنوع من المادة نفسها ، ويجب أن تكون العينة ممثلة تماما للمادة المستخدمة في إنشاء الجهاز .

4.6.3 اختبارات غير متلفة (Non-Destructive Tests)

غالبا ما تجرى وتنفذ مثل هذه الاختبارات من أجل الأهداف التالية :

- (a) اختبار الأجزاء أو المركبات النهائية أو كليهما .

(b) تقدير خواص الأجزاء المصنعة في مراحل التصنيع المتعددة ، حتى يمكن التأكد أولاً بأول من سلامة الأجزاء المستخدمة ، وخاصة في الصناعات المهمة مثل صناعة الطائرات أو المنشآت النووية .

وتعد هذه الاختبارات ضرورية لضبط الجودة في أي صناعة . وأهم الاختبارات الميكانيكية التي تستعمل في هذه الحالة هي اختبار الصلادة ، حيث يمكن تقدير مقاومة المنتج من علاقة الصلادة بمقاومة المادة التي سبق توضيحها .

5.6.3 اختبارات الإثبات (Proving Tests)

غالباً ما تتبع هذه مجموعة الاختبارات غير المتلفة ، ونعني بها اختبار جميع الأجزاء وفحصها عند أقصى ظروف الخدمة أو التصميم قبل أن تسلم إلى المشتري أو تستخدم في الحياة العملية . ومن أمثلتها ما يجري على خطافات الرافعة وسلاسل السلامة ، قبل استخدامها للتأكد من مطابقتها لظروف العمل نظراً لأن فشلها أثناء الخدمة هو ذو خطورة كبيرة . ومثال آخر على اختبارات الإثبات هو اختبار الصلادة ، الذي يجري على محاور العجلات الذاتية بعد إجراء عمليات المعالجة الحرارية عليها ، وذلك للتأكد من خواصها . وفي جميع الحالات فإن تلك الاختبارات تكون سهلة وبسيطة وسريعة وتعطي نتائج موثوق بها .

6.6.3 اختبارات التفتيش أو التحري (Inspection Tests)

تعد اختبارات التفتيش أو التحري من مجموعة الاختبارات غير المتلفة ، وتهدف إلى التأكد من الحصول على الخواص النهائية المطلوبة للمادة ، وغالباً ما تكون النتائج نوعية وليست كمية . ويتراوح الفحص في هذه الاختبارات ما بين الفحص الخارجي بمجرد النظر للتأكد من الأبعاد

ونعومة السطح ، إلى استخدام الأشعة السينية والموجات فوق الصوتية وأشعة الليزر للكشف عن العيوب الداخلية في المادة .

والجدير بالذكر أن الاختبارات الميكانيكية التي تجرى على المادة والنتائج التي يتم الحصول عليها لا يمكن تقديمها الإجابة القاطعة والمحددة لمهندس التصميم مهما كانت دقة الأجهزة المستخدمة ونوعيتها . يعود ذلك إلى أن هذه الاختبارات تجرى على المواد عند ظروف مفتعلة وغير عملية ، وليس بينها وبين الظروف الفعلية التي تستخدم فيها المادة علاقة كبيرة. إن نتائج مثل تلك الاختبارات لا يمكن تطبيقها على المادة عند ظروف العمل الاعتيادية مع توفر الخبرة الطويلة لمهندس التصميم .

7.3 الاختبارات الميكانيكية المعملية (Laboratory Mechanical Tests)

1.7.3 اختبار الشد (Tension Test)

إن اختبار الشد إضافة إلى اختبار الإنضغاط هو من أهم الاختبارات الميكانيكية ، وكلاهما يعتبر الأكثر شيوعا واستخداما من بقية الاختبارات الميكانيكية الأخرى ، ولقد تم في الجزء الأول من هذا الباب مناقشة الإجهاد وتعريفه والانفعال ونقطة الخضوع ومعامل المرونة والعلاقة بينهما. ويمكن من العلاقة بين الإجهاد والانفعال الموضحة في الشكل (1-3) تقدير معامل المرونة ونقطة الخضوع وإجهاد الصمود ، وكذلك أقصى مقاومة للشد .

كما وتعطي منحنيات الإجهاد - والانفعال الحقيقي معلومات أفضل عن خصائص التصد بالتشكيل . ومن الصعب الحصول على هذه المنحنيات كما أنها تتطلب مساحة المقطع الفعلية عند كل حمولة . وفي معظم التطبيقات

الهندسية ، عند إجراء اختبار الشد ، يتم قراءة كل من الحمولة المستخدمة التي يمكن أن تحول مباشرة في بعض الأجهزة إلى الإجهاد ، كما يمكن قراءة الانفعال الحادث في المادة مباشرة من ماكينات الاختبار .

إن معظم الماكينات المستخدمة في اختبار الشد يمكنها قراءة الحمولة إلى درجة بالغة من الدقة تبلغ حوالي $\pm 1\%$ ، وتتم قراءتها بوحدات (باوند أو طن أو كيلوجرام) ، أما الانفعال المشوه الحادث فإنه يقاس بوحدات الطول ، ويمكن من تلك البيانات رسم العلاقة بين الإجهاد والانفعال وتقدير الخواص المطلوبة للمادة من استخدام منحنى الإجهاد - الانفعال .

وتقاس أبعاد العينة قبل بدء الاختبار وبعده ، ومنها يمكن الحصول على النسبة المئوية لخفض المساحة السطحية والنسبة المئوية للاستطالة بالنسبة لممدول مقياس الطول (gauge length) .

ويمكن من البيانات التي نحصل عليها من اختبارات الشد تقدير كل من إجهاد الخضوع (إجهاد الاستدلال) ، وأقصى مقاومة شد ، ومقاومة (إجهاد) الكسر ، بالإضافة إلى الانفعال وكذلك نقصان المساحة السطحية وغيرها كما سبق شرحه في البنود السابقة .

مكائن اختبار الشد (Tensile Testing Machines)

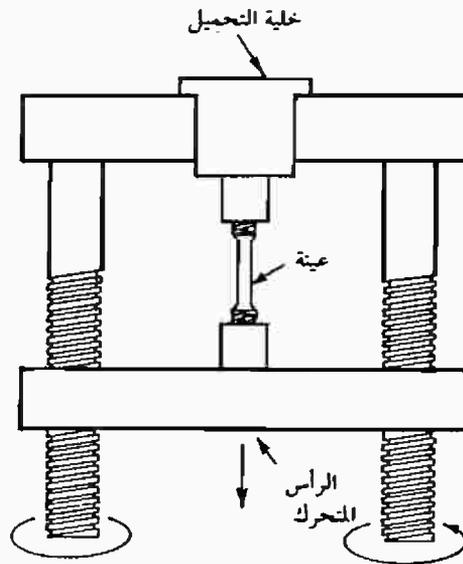
إن عمل ماكينات اختبار الشد هو تكريس الحمل على العينة مع قراءة ذلك الحمل بدقة . وتوجد عدة أنواع تجارية مختلفة من تلك الماكينات . ويمكن تقسيمها إلى نوعين رئيسيين هما الماكينات المنضدية السطحية ، وماكنات التحميل الهيدروليكي أو اللولبي وهي ما تعرف بالماكنات الكبيرة .

(a) ماكينات الشد المنضدية (السطحية)

تعمل هذه الماكينات بشكل يدوي أو قد تكون متصلة بمحرك ، وفي الغالب فإنها ماكينات ذات قدرة صغيرة ، وتستخدم للمواد ضعيفة المقاومة مثل الألياف والبلاستيك والجلود والأوراق ، ومثال هذه الماكينة موضح في الشكل (3-12) ، ويتم في ماكينات الشد المنضدية زيادة الحمل تدريجياً وأخذ القراءات عند كل حمل مستخدم .

(b) ماكينات الشد الكبيرة

لقد حلت هذه الماكينات محل الماكينات القديمة نظرا لإمكانية استعمالها في أغراض متنوعة ، وأشهر الأنواع هو ما يعرف باسم مكائن الاختبار العام (Universal Machines) ، ويمكن استخدام تلك الماكينات لكل من اختبارات الشد والانضغاط والانحناء ، وهي مجهزة لقراءة الحمل المؤثر والانفعال الحادث حيث تظهر قراءة الحمل مباشرة على مبيّن مدرّج .



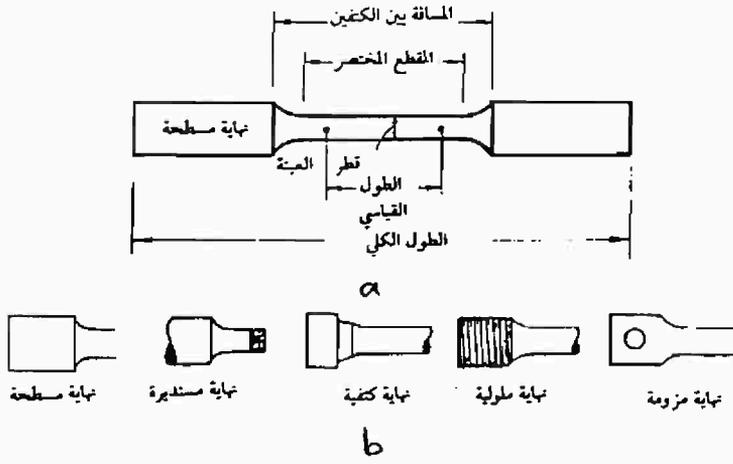
الشكل (3 - 12)

مقطع في ماكينة اختبار الشد المنضدية

توجد في الوقت الحالي ماكينة للاختبارات الميكانيكية العامة وهذه تعرف باسم ماكينة انسترون (Instron Machine) وهي ذات كفاءة عالية وتعطي نتائج على درجة عالية من الدقة ، ويصل أقصى حمل يمكن أن يستعمل فيها 100000kg . ويتم تحميل هذه الماكينة تلقائياً وكذلك يمكن تغيير الحمل دورياً ، ويوجد بها معدة إلكترونية لقياس الانفعال الإلكتروني من خلال تكبير الانفعالات الحادثة ، وبالذات في منطقة المرونة حيث يكون الانفعال صغيراً للغاية ولمئات المرات وذلك عن طريق تكبير الإشارات القادمة من المادة إلى مسجل الانفعال ، وبهذا تكون المنحنيات أكثر وضوحاً.

ويمكن استبدال تلك المعدة الإلكترونية بمعدة أخرى مختلفة التدرج حيث يوجد العديد منها وبتدرجات حسب نوع الفلز المختبر، كما يصلح بعضها الآخر في اختبارات المواد السيراميكية والبلاستيك . ولما كانت دقة نتائج اختبارات الشد تعتمد كثيراً على كيفية اختبار العينة وطريقة تحضيرها وكذلك على أبعاد تلك العينة ، لذا يكون مهماً تحضير العينات بدقة والالتزام بالموصفات القياسية للحصول على نتائج مرضية . وعلى الرغم من ذلك ، فإن الاختبارات التجارية أو الوتيرية تستخدم عينات غير جاهزة ومن الممكن أن تكون مصبوبة أو مدلفنة أو غير ذلك من طرق التشكيل . ولقد وضعت الجمعية الأمريكية للاختبارات والمواد مواصفات للعينات من ناحية الطول وكذلك شكل الأطراف نظراً لأن الانفعال ودقة النتائج تعتمد على طول العينة وشكل الأطراف .

وتكون معظم العينات إما مدوّرة أو مسطحة المقطع . وبالنسبة للعينات المدوّرة ، فإن النهايات تكون إما نهاية ذات كتف ، أو نهاية لولبية ، أو نهاية عادية بينما تكون أطراف العينات المسطحة المقطع ، إما نهايات عادية أو نهايات لولبية ، ويوضح الشكل (3-14) أشكال هذه العينات . كما ويبين الجدول (3-1) أبعاد العينات التي تستخدم في إجراء الاختبار .



الشكل (3 - 14)

إشكال العينات المستخدمة في اختبار الشد
 (a) تفاصيل أبعاد العينة (b) الأنواع المختلفة لنهايات العينة

جدول (3 - 1)

الأبعاد القياسية لعينات اختبار الشد (*)

نوع العينة					الأبعاد القياسية
مزومة	ذات كتف	لولبية	مدورة	مسطحة	
0,005+2,000	0,005+2,000	0,005+2,000	0,005+2,000	2,002+0,005	المقاس
0,010+0,500	0,010+0,500	0,010+0,500	0,010+0,500	0,01+0,500	العرض أو القطر بالأنج
0,625	—	—	—	سمك المادة المستخدمة	السمك بالأنج
$\frac{1}{2}$ أنج	$\frac{1}{16}$ أنج	$\frac{3}{8}$ أنج	$\frac{3}{8}$ أنج	$\frac{1}{2}$ أنج على الأقل	نصف القطر بالأنج
8 أنج على الأقل	5.5 أنج تقريبا	5 أنجات تقريبا	—	8 أنج على الأقل	الطول الكلي بالأنج
2 أنج على الأقل	4 أنجات	2,5 أنج على الأقل	2,25 أنج	2,25 أنج على الأقل	المقطع المصغر بالأنج

مقطع المقبض بالأنج	2 أنج	—	1,375 أنج	$\frac{3}{4}$ أنج	2 أنج
العرض أو القطر بالأنج	$\frac{3}{4}$ أنج	—	$\frac{3}{4}$ أنج	$\frac{23}{32}$ أنج	$\frac{3}{4}$ أنج
قطر الفتحة، أنج	—	—	—	—	—
بعد الطرف ، أنج	—	—	—	—	—
البعد عن فتحة اللولبية، أنج	—	—	—	—	—

(*) هذه العينات القياسية فيما سبق ولقد استبدلت حاليا بأبعاد قياسية مترية .

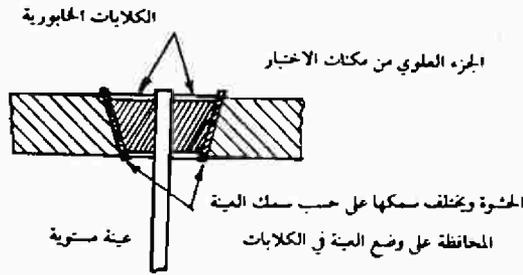
ولكي تمسك العينات بإحكام ، فقد صممت عدة قبضات (ماسكات) لتثبيت العينة بإحكام كما في شكل (3 - 15) ، وأهم أنواع الماسكات المستخدمة هي الأنواع التالية :

- 1 - ذات فلق بسفين - وتستخدم للعينات العادية، والمدورة، والسطحية .
- 2 - لولبية - وتستخدم للعينات ذات النهايات اللولبية .
- 3 - ذات كتف - وتستخدم للعينات ذات الكتف .
- 4 - نوع خاص - تستخدم لاختبارات المطاط ، والأقمشة ، والبلاستيك والألياف وكذلك الأسلاك .

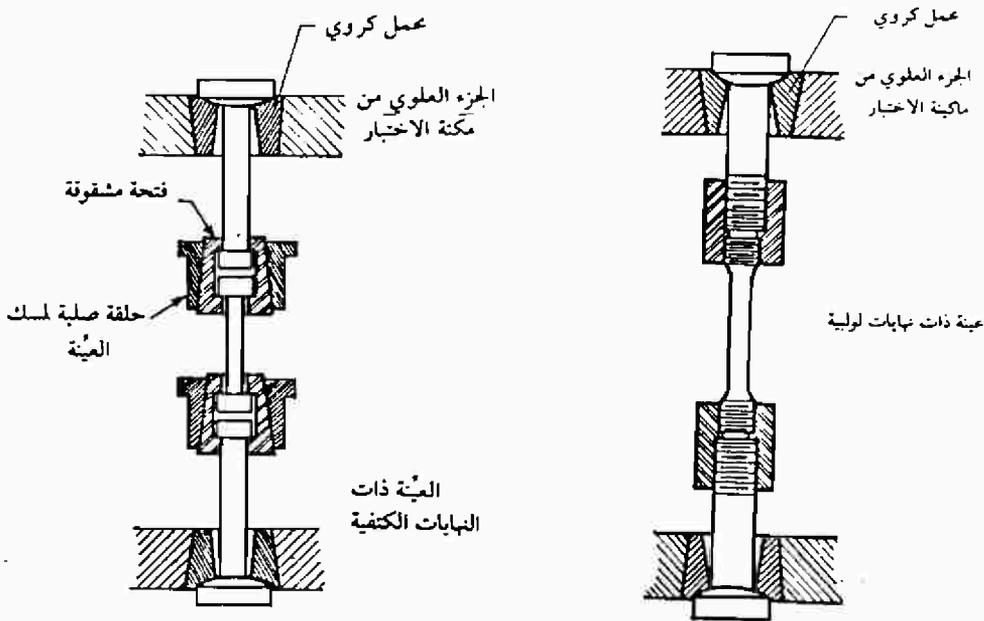
ولإجراء اختبارات الشد فإن هناك عدة أمور لا بد من مراعاتها وأخذها بعين الاعتبار وهي ما يلي :

- (a) أن تكون العينة في وضع رأسي تماما حتى تكون كل الأحمال والتحميل في وضع رأسي، ويكون الإجهاد الناتج في اتجاه محوري .
- (b) تقدير سرعة تحميل العينة جيدا وبغاية ، حيث تختلف سرعة التحميل حسب نوع المادة المختبرة ، وكذلك تختلف سرعة التحميل قبل نقطة الخضوع وبعدها . وتكون سرعة التحميل للفئات 2mm

(0.125in) ، للدقيقة حتى نقطة الخضوع ، ثم تزيد بعد ذلك لتصل إلى (0.5in) 8mm ، للدقيقة حتى نقطة الكسر . وفيما يلي بعض الأمثلة لتوضيح بعض الاختبارات السابق ذكرها وكيفية استخدامها في معرفة بعض الخواص المهمة للمواد .



(a) كلابات العينات المسطحة والمستوية



(b) كلابات العينات ذات النهايات الملولبة (c) كلابات العينات ذات النهايات الكتفية

الشكل (3-15) الأنواع المختلفة للكلابات المستخدمة لمسك العينات

مثال (1-3)

أجري اختبار الشد على عينة من مادة ما ، ولقد كان قطر العينة قبل إجراء الاختبار 0.500in ، أما القطر النهائي بعد الانتهاء من إجراء الاختبار فكان 0.455in . فإذا كان مدلول الطول القياسي 2in ، ثم بلغ هذا 2.270in بعد إجراء الاختبار . والمعلومات التي سجلت أثناء التجربة موضحة في الجدول (a) .

الجدول (a) الخاص بالمثال (1-1)

الاستطالة (Δl)، أنج	الحمل (رطل)	الاستطالة (Δl)، أنج	الحمل (رطل)
0,00500	12,760	0,00032	1,000
0,00550	12,950	0,00046	2,000
0,00600	13,150	0,00127	4,000
0,00700	12,760	0,00159	5,000
0,00800	12,560	0,00192	6,000
0,00900	12,950	0,00205	8,000
0,01200	14,720	0,00318	10,000
0,01400	14,920	0,00380	11,930
0,01600	14,325	0,00390	11,970
0,01800	12,170	0,00400	12,170
		0,00450	12,560

- المطلوب من البيانات السابقة إيجاد ما يلي :
- مقدار الأجهادات المناظرة للأحمال المؤثرة .
 - مقدار الانفعال المناظر لكل إجهاد .
 - رسم العلاقة بين الإجهاد والانفعال بيانيا .
 - معامل المرونة .
 - إجهاد الحد التناسبي (إجهاد الخضوع) .

- (f) مقاومة المادة للتشد .
 (g) مقاومة الكسر الهندسية .
 (h) مقاومة الكسر الحقيقية .
 (i) إجهاد الصمود عند (0,2%) من الانفعال الكلي .
 (j) النسبة المئوية للاستطالة .
 (k) النسبة المئوية للنقص في المساحة السطحية .

الحل :

المساحة السطحية الأولية تساوي :

$$A_o = \frac{\pi}{4} D_o^2$$

$$= \frac{\pi}{4} (0.500)^2 = 0.196 \text{ sq. in}$$

أما المساحة السطحية عند الكسر :

$$A_f = \frac{\pi}{4} D^2$$

$$= \frac{\pi}{4} (0.455)^2 = 0.163 \text{ sq. in}$$

(a) الإجهاد عند كل حمولة يعطى حسب العلاقة التالية :

الإجهاد = الحمولة/المساحة الأولية

أي أن :

$$\sigma = \frac{\text{load}}{A}$$

ومقادير الأجهادات عند كل حمولة موضحة في الجدول (b) .

(b) الانفعال وهو :

$$\varepsilon = \frac{l_f - l_o}{l_o} = \frac{\text{Final Length} - \text{Initial Length}}{\text{Initial Length}} = \frac{\Delta l}{l_o}$$

ومقادير الانفعالات الحادثة موضحة أيضاً في الجدول (b) .

(c) العلاقة بين الإجهاد والانفعال موضحة في الشكل (3 - 16) .

(d) معامل المرونة يعطى حسب العلاقة التالية :

$$\text{معامل المرونة} = \frac{\text{الإجهاد}}{\text{الانفعال}}$$

وذلك ما توضحه المنطقة الخطية في الشكل (3-16) ، ويوضح العلاقة بينهما حيث أن :

$$E = \frac{\text{Stress}}{\text{Strain}} = \frac{50.955 \times 10^3}{0.159} = 32 \times 10^4 \text{ psi}$$

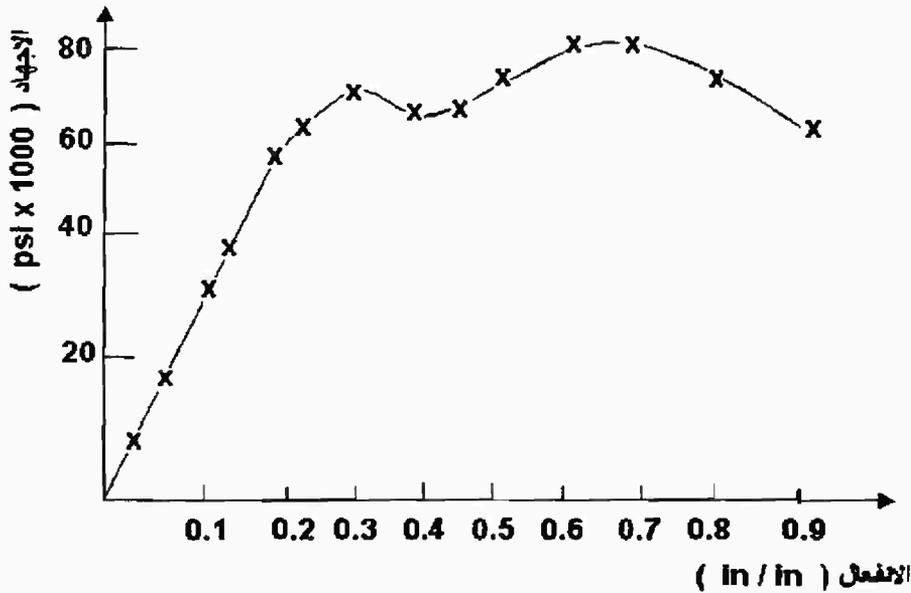
(e) حد المرونة أو جهد المرونة هو نهاية العلاقة الخطية بين الإجهاد والانفعال ومن الشكل (3 - 16) ، يتبين أن حد المرونة هو (60.79 x 10³ psi) .

(f) مقاومة المادة يتم الحصول عليها من العلاقة بين الإجهاد - والانفعال الموضحة في الشكل (3-16) ، وقيمة مقاومة الشد هي أكبر قيمة يصل إليها إجهاد الشد وعلى هذا الأساس ، فإن مقاومة المادة للشد تساوي (76.025 x 10³ psi) .

(g) مقاومة الكسر الهندسية، وهي كما تم تعريفها سابقاً قيمة إجهاد الكسر ، ويحصل عليها من الرسم وهي آخر نقطة في المنحنى ، أي أن مقاومة الكسر الهندسية هي $(62.012 \times 10^3 \text{ psi})$.

(h) مقاومة الكسر الحقيقية ، وهي تعادل الإجهاد الحقيقي ، ويتم الحصول عليها بقسمة الحمولة على المساحة الحقيقية للمقطع عند نقطة الكسر . إن إجهاد الكسر الحقيقي يحسب من المعادلة التالية :

$$74.663 \times 10^4 \text{ psi} = \frac{12,170}{0,163} = \frac{\text{حمل الكسر}}{\text{مساحة المقطع عند الكسر}} = \text{إجهاد الكسر الحقيقي}$$



الشكل (16-3)

العلاقة بين الأجهاد – والانفعال في المثال (1-1)

(i) قيمة إجهاد الموازنة (الاستدلال) ، يتم الحصول عليها من الرسم البياني الموضح في الشكل (16-3) ، وذلك برسم خط موازي للخط المستقيم في الشكل نوجد قيمة إجهاد الخضوع وهو يساوي $(62.8 \times 10^3 \text{ psi})$.

$$(j) \text{ النسبة المئوية للاستطالة} = \frac{\text{الطول النهائي} - \text{الطول الأصلي}}{\text{الطول الأصلي}} \times 100$$

أو :

$$\text{Percentage Elongation} = \frac{2.270 - 2.000}{2.000} \times 100$$

$$\therefore \% EL = \% 13.5$$

$$(k) \text{ النسبة المئوية للنقص في المساحة} = \frac{\text{المساحة الأصلية} - \text{المساحة النهائية}}{\text{المساحة الأصلية}} \times 100$$

أو :

$$\text{Percentage Reduction in Area} = \frac{A_o - A_f}{A_o} \times 100$$

$$\therefore \% RA = \left(\frac{0.196 - 0.163}{0.196} \times 100 \right) = \% 16.84$$

الجدول (b) الخاص بالمثل (1-1)

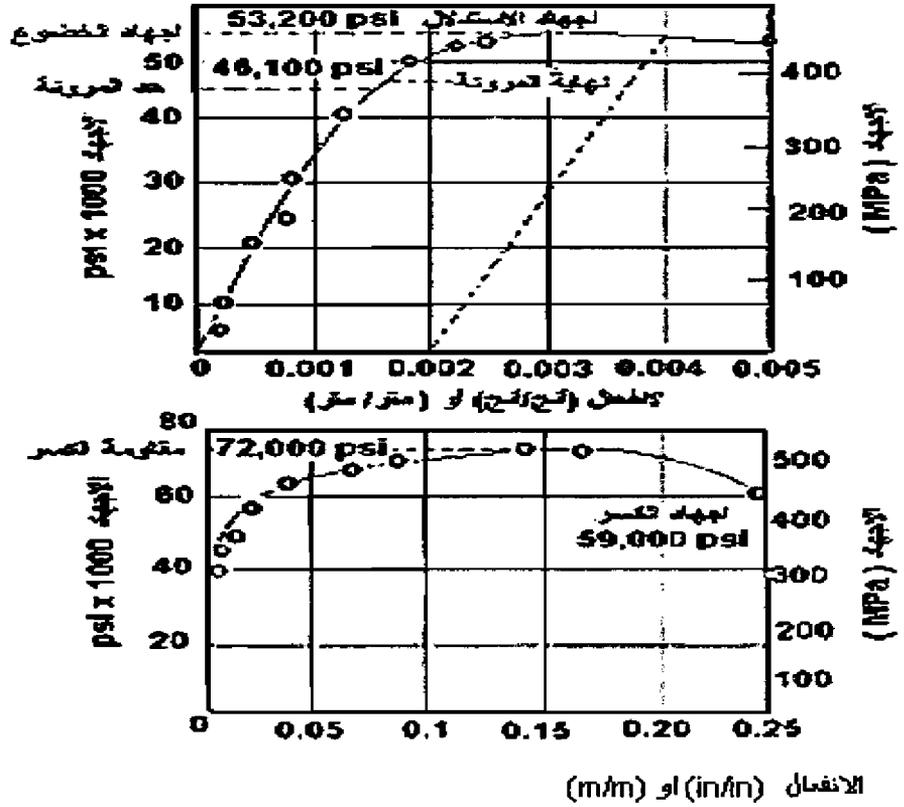
الانفعال (%)	الاستطالة (أنج)	الإجهاد (باوند/أنج ²)	الحمل (باوند)
0,016	0,00032	5,096	1,000
0,032	0,00064	10,191	2,000
0,064	0,00127	20,382	4,000
0,080	0,00159	25,478	5,000
0,096	0,00191	30,573	6,000
0,128	0,00255	40,764	8,000
0,159	0,00318	50,955	10,000
0,190	0,00380	60,790	11,930
0,195	0,00390	60,993	11,970
0,200	0,00400	60,012	12,170
0,225	0,00450	63,999	12,560
0,250	0,00500	65,019	12,760

0,275	0,00550	65,987	12,950
0,300	0,00600	67,006	13,150
0,350	0,00700	65,019	12,760
0,400	0,00800	63,999	12,560
0,450	0,00900	65,987	12,950
0,600	0,01200	75,006	14,720
0,700	0,01400	76,025	14,920
0,800	0,01600	72,993	14,325
0,900	0,01800	62,012	12,170

مثال (2-3)

أجريت تجربة لاختبار الشد على إحدى المواد والتي أعطت النتائج الموجودة في الشكل (3-17) بالاستفادة من المعلومات المبينة في الشكل أوجد :

- معامل المرونة .
- جهد الخضوع (الحد التناسبي) .
- أقصى مقاومة للمادة .
- مقاومة الكسر الهندسية .
- مقاومة الكسر الفعلية .
- إجهاد الموازنة عند 0.2% (إجهاد الاستدلال) .
- النسبة المئوية للاستطالة .
- نسبة النقص في المساحة السطحية .



الشكل (3-17)

علاقة الأجهاد - والانفعال للمثال (2-3)

الحل :

(a) معامل المرونة " E " هو ميل الجزء المستقيم من منحنى العلاقة بين الإجهاد والانفعال. ومن الشكل (17-3) نستنتج أن الميل هو :

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{35,000}{0.00175} = 2 \times 10^7 \text{ psi}$$

(b) يمكن الحصول على جهد حد التناسب (P.L.) من الشكل (17-3) ، ونقتر هذه القيمة عندما يكون الإجهاد غير متناسب مع الانفعال أي أن ، جهد حد

التناسب (P.L.) = 35,000 psi ، ويمكن تعريف جهد حد التناسب (P.L.) بأنه قيمة جهد الخضوع نفسه .

(c) قيمة أقصى مقاومة للشّد وهي أقصى مقاومة للمادة (U.T.S.) ، ويعبر أقصى جهد يظهر في العلاقة بين الإجهاد - والانفعال ، ويعادل أقصى نقطة للجهد في المنحنى . مقاومة المادة للشّد (U.T.S.) = 68,000 psi .
 (d) مقاومة الكسر الهندسية (B.S.) ، تقتر هذه المقاومة على أساس المساحة الأصلية للمادة ، ويمكن الحصول عليها مباشرة من الرسم . مساحة الكسر الهندسية (B.S.) = 60,000 psi .
 (e) مقاومة الكسر الفعلية الحقيقية (True B.S.) وتحسب على أساس المساحة الفعلية عند لحظة الكسر حيث أن :

$$\text{true rupture strength} = \frac{P}{A_{\text{actual}}} = \text{مقاومة الكسر الفعلية}$$

ولحساب الحمل عند هذه اللحظة - لحظة الكسر - فإن :

$$B.S. = \frac{P}{A_o}$$

$$A_o = \frac{\pi}{4} (0.503)^2 = 0.199 \text{ in}^2$$

$$B.S. = 60,000 \Rightarrow \therefore 60,000 = \frac{P}{0.199} \Rightarrow \therefore P = 11,928 \text{ lb}$$

$$\therefore \text{True B.S.} = \frac{11,928}{\frac{\pi}{4} (0.455)^2} = 73,330 \text{ psi}$$

وهي قيمة مقاومة الكسر الحقيقية للمادة .

(f) يقتر إجهاد الاستدلال (P.S.) أو الموازنة عند 0.2% من الانفعال الكلي ، وللحصول عليه يرسم خط موازي للجزء الخطي من منحنى الإجهاد - والانفعال ، ومن النقطة التي تمثل 0.2% على خط الانفعال .

ويتطبيق ذلك على الرسم نحصل على قيمة إجهاد الاستدلال حيث إن
 . 36.000 psi = (P.S.)

(g) النسبة المئوية للاستطالة تحسب من القانون التالي :

$$\text{Percentage Elongation} = \frac{l_f - l_o}{l_o} \times 100 = \frac{2.32 - 2.00}{2.00} \times 100 = \%16$$

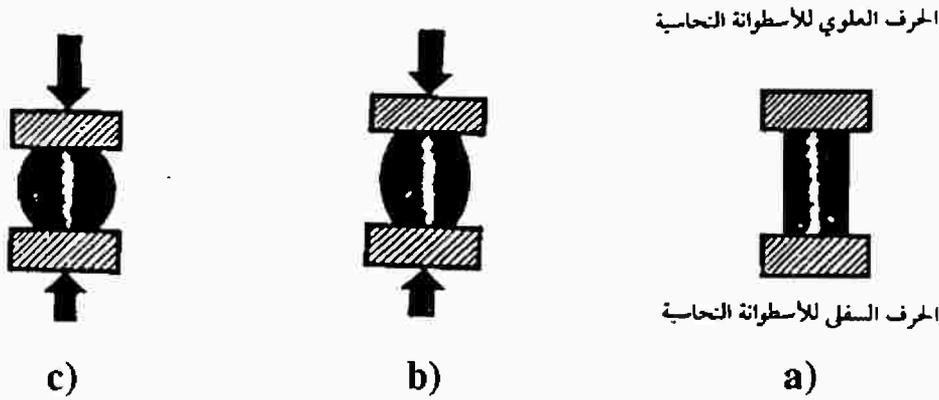
(h) نسبة التخفيض في المساحة نحصل عليها من المعادلة التالية :

$$\begin{aligned} \text{Percentage Reduction in Area} &= \frac{A_o - A_f}{A_o} \times 100 \\ &= \frac{\frac{\pi}{4} (0.503)^2 - \frac{\pi}{4} (0.455)^2}{\frac{\pi}{4} (0.503)^2} \times 100 \\ &= \%18 \end{aligned}$$

2.7.3 اختبار الانضغاط (Compression Test)

يمكن القول أن اختبار الانضغاط هو عكس اختبار الشد وذلك فيما يتعلق باتجاه الحمولة أحادية المحور المؤثرة على المادة . ونادراً ما يتم اختبار المواد تحت ظروف الانضغاط حيث أن نتائج هذا الاختبار غير دقيقة إضافة إلى صعوبة توجيه الحمل بصورة رأسية تماماً . وعلى الرغم من ذلك ، فإن الفلزات القصيفة مثل الحديد الزهر تكون أسهل عند إجراء اختبار الانضغاط لها مما هي عليه في اختبارات الشد . إضافة إلى أن اختبار الانضغاط لمثل تلك المواد يعطي نتائج ذات معنى مجدد ، ولهذا يستخدم هذا الاختبار في مسائل التصميم بالنسبة للمواد القصيفة ، والمواد التي يتم إجراء

اختبار الانضغاط عليها هي حديد الزهر والخرسانة المسلحة والملاط والطوب والخزفيات والخشب ، فمن المعلوم أنه يستحيل إجراء اختبار الشد على المواد المذكورة مباشرة نظرا للصعوبات في تصميم الماسكات التي يمكن بها تثبيت العينة في جهاز الشد . إن التغير الحادث عند إجراء اختبار الانضغاط موضح في الشكل (3 - 18) .



الشكل (3- 18)

التغير الحادث في شكل العينة المختبرة بالانضغاط

(a) العينة قبل التحميل (b) العينة أثناء التحميل (c) العينة في مراحل التحميل المتقدمة

توجد العديد من المشاكل التي تواجه اختبار الانضغاط للمواد نذكر منها :

1- من الصعب جدا أن تكون الحمولة في اتجاه رأسي فقط أي باتجاه محور واحد وذلك بسبب صعوبة وضع العينة في المركز بصورة تامة ، ولهذا فقد أدخل تعديل على شكل طرفي العينة للتأكد من أن اتجاه الحمولة هو رأسي ، كما هو موضح في الشكل (3-19) ، إضافة إلى وضع طربوش في نهاية العينة .

2- يتولد في العينة في معظم الحالات إجهاد انحناء أثناء اختبار الانضغاط اعتمادا على طول العينة ، ولكن يمكن التغلب على ذلك باختبار الأبعاد

المناسبة . وتتص المواصفات القياسية على أن يكون هناك تناسب بين طول العينة وقطرها ، وهذه النسب للمواد الفلزية هي على النحو التالي :

(a) العينات القصيرة : الطول = 0.9 من القطر

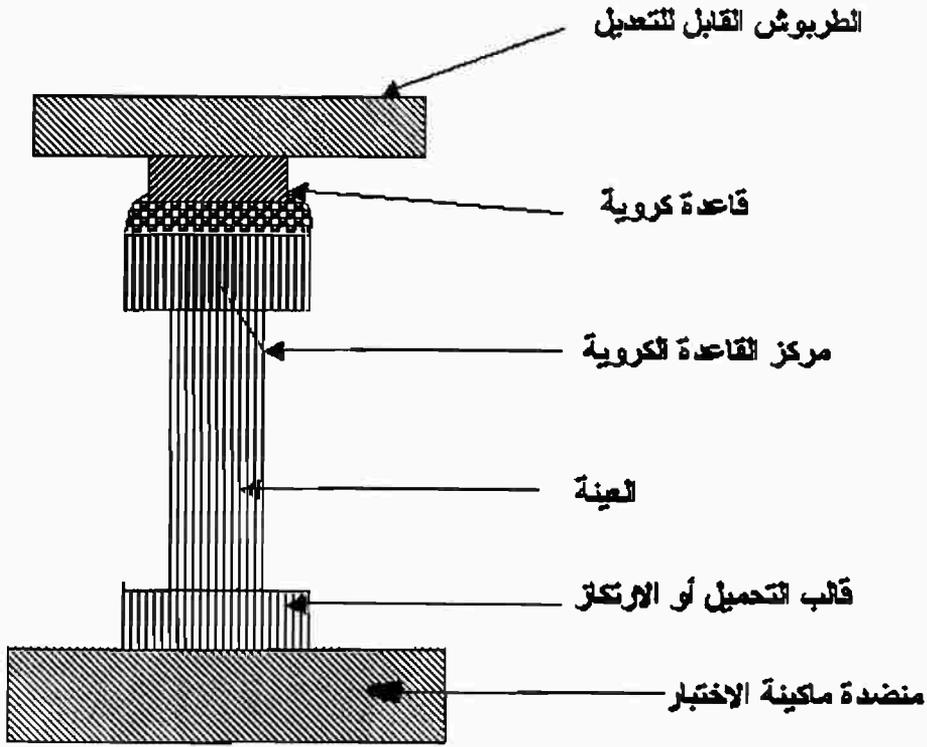
(b) العينات المتوسطة : الطول = 3 أمثال القطر

(c) العينات الطويلة : الطول = 8 أمثال القطر

وعند اختبار الانضغاط للأخشاب ، فإن حجم المادة يكون 32in^3 أي بالأبعاد $8 \times 2 \times 2\text{in}^3$ ، وإذا كان المطلوب تحديد معامل المرونة ، فيصبح الطول 6in بدلا من 8in ، أما لمادة الخرسانة (الكونكريت) ، فيكون ارتفاع المادة 12in بوصة وقطرها 6in بوصات ، ولكن عند اختبار الملاط والأسمنت ، فيكون حجم العينة 3in فقط .

3- يؤثر الاحتكاك إلى حد كبير ما بين سطح العينة والفك السفلي لماكينه الاختبار وكذلك المنضدة .

4- يتطلب اختبار الانضغاط حمولات أكبر من الحمولات المطلوبة لاختبارات الشد ، وخاصة بالنسبة للعينات ذات المقطع الكبير ، وفي بعض الأحيان يصعب إجراء الاختبار حتى نقطة الكسر لوجود قصور في ماكينات الاختبار المتوفرة . وبصورة عامة فإن اختبارات الانضغاط محدودة الاستخدام ، ولا تستعمل للفلات والسبائك إلا في حالات قليلة وبالذات للمواد الفلزية القصيفة .



الشكل (3-19) الطربوش القابل للتعديل الموضوع لعينات اختبار الضغط
وفق لمواصفات ASTM

3.7.3 اختبار الصلادة (Hardness Test)

إن الصلادة كما ذكرنا سابقا هي مقاومة المادة للخدش أو الاحتراق بمادة أخرى . وبالتالي فإن هذه الخاصية تعتمد على خواص أخرى للمادة منها معامل المرونة ومقاومة الشد ونقطة الخضوع والمطيلية . ولهذا فإن تقدير رقم الصلادة لمادة يمكن أن يعطي مؤشرا للخواص الميكانيكية الأخرى. ويمتاز اختبار الصلادة بما يلي:

- 1 - يدخل ضمن الاختبارات غير المتلفة ، لذلك يمكن استخدامه للمواد في صورتها النهائية دون حدوث تغيير في خواصها أو طبيعتها .
- 2 - سهولة إجرائه وهو اختبار سهل وبسيط .

3- يمكن الحصول على معلومات حول تأثير المعاملة الحرارية والميكانيكية على المادة من خلال هذا الاختبار دون تلف المادة .

4- يمكن عن طريقه تقدير مقاومة المادة للشد دون إتلافها وذلك من العلاقة بين الشد والصلادة .

(مقاومة المادة للشد (psi) = 500 x رقم برنل للصلادة) أو :

$$T.S. = 500 \times BHN \dots\dots\dots(16-3)$$

(مقاومة الشد (Mpa) = 3.45 x رقم برنل للصلادة) أو :

$$T.S.(MPa) = 3.45 \times BHN \dots\dots\dots(17-3)$$

حيث أن : T.S. = مقاومة الشد بالوحدات الموضحة في كلا المعادلتين .
BHN = رقم برنل للصلادة .

5 - إمكانية إجراء الاختبار في موقع العمل لتوفر بعض الأجهزة الخفيفة التي يمكن نقلها إلى حيث توجد المواد المطلوب اختبارها. وتوجد العديد من طرق قياس الصلادة موضحة في الجدول (2-3) ، ويعتمد رقم الصلادة الناتج من القياسات على الطريقة المتبعة وكذلك الخواص الفيزيائية للمادة . وأكثر طرق اختبارات الصلادة استخداما هي طريقة " برنل " وطريقة " روكويل " وطريقة " فيكرز " إضافة إلى مقياس الصلادة الدقيقة و كذلك الاسكليروسكوب (كشف الصلادة النسبية) ، والاختلافات الأساسية بين الطرق هي في طريقة التحميل ونوع المخترق . وبعض أنواع المخترقات المستخدمة في اختبارات الصلادة موضحة في الشكل (3-20) . وفيما يلي نقدم موجز للقياسات التي سبق ذكرها.

جدول (2.3) مقارنة بين الطرق الرئيسية لاختبارك الصلابة

الصلابة	الصلابة الكوبن	الصلابة	الصلابة	الصلابة	الصلابة
مطرفة ولطف بها من ارتفاع معين	كلوب زاوية الرأس 136 درجة	شوم زاوية رأسه 136 درجة	مكروظ 120 درجة وكيرات أقطارها $1 \frac{3}{2}$ و $1 \frac{1}{6}$ البج	مكروظ 120 درجة وكيرات أقطارها $1 \frac{3}{2}$ و $1 \frac{1}{6}$ البج	المكروظ الصلابة
	بكر اوج الصحن ما بين 1 جرام إلى 1 كيلوجرام.	يغواج من 1 كجم إلى 120 كجم ولكن في المتوسط هو 5 - 3 كجم	في المادة 10 كجم، حمل صلب، 60، 100، و150 كجم للأصصال الكبيرة. للأختبار السطحي حمل صلب 3 كجم حمل كبير 4565 كجم	في المادة 10 كجم، حمل صلب، 60، 100، و150 كجم للأصصال الكبيرة. للأختبار السطحي حمل صلب 3 كجم حمل كبير 4565 كجم	الأصصال الصلابة
مقياس واحد	مقياس واحد	مقياس واحد	هناك 15 مقياس للأختبارات الداخلية أظرفها استخدما المقياس B و G في الجدران السطحية هناك خمسة مقياس أشهرها مقياس C	هناك 15 مقياس للأختبارات الداخلية أظرفها استخدما المقياس B و G في الجدران السطحية هناك خمسة مقياس أشهرها مقياس C	مقياس الصلابة
استخدم تقريبا لكل شبرم وللأجزاء الصغيرة والكبيرة والسويكة والمركبات القلوية وشميد القلوية	استخدم حالها لشمواه ذاك الصلابة المائية والركوية جدا مثل الرجراج والسطوح المغطاة والركائز وحبوبات المادة.	استخدم للأجزاء الصغيرة إضافة إلى استخدامها لأجزاء التفتيول الركبسة 0.005 بسبك البج	للأجزاء القلوية الصغيرة المتكئة أو كامة الصلابة مثل الأنواع القلوية والأسلاك وأنواع القطع والكشيف والكرات والصلامات والبلاستيك.	للأجزاء القلوية الصغيرة المتكئة أو كامة الصلابة مثل الأنواع القلوية والأسلاك وأنواع القطع والكشيف والكرات والصلامات والبلاستيك.	التطبيقات الأساسية
المطووب سطح أملس و لطيف.	لا بد أن يكون السطح نظيف جدا وملمسا ومستويا	لا بد أن يكون السطح ناعم وأملس ولطيف	لا بد أن يكون السطح ناعم وأملس	لا بد أن يكون السطح ناعم وأملس	سطح المونة



كرة قطرها 10 مم
اختبار برينل للصلادة



ماس زاويته 120°
اختبار روكويل N.A.C



كرة بقطر 1/16 بوصة
اختبار روكويل T.B



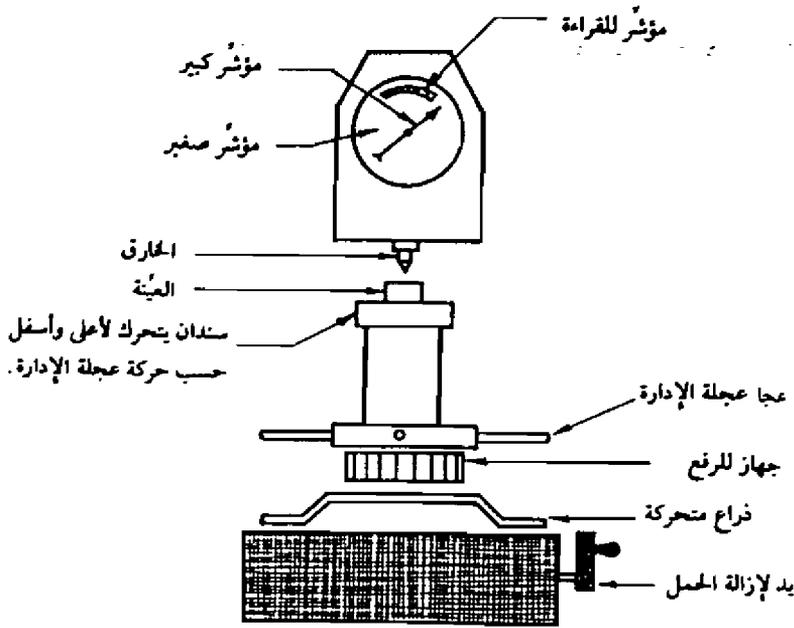
إبرة بزاوية 20°
اختبار شور D.A

الشكل (3 - 20)

أنواع مختلفة للخارقات المستخدمة في اختبارات الصلادة

1-3.7.3 اختبار برينل للصلادة (Brinell Hardness Test)

تستخدم في هذا الاختبار كرة من الفولاذ المصلد ، أو كرة مصنوعة من كربيدات التنجستن الملبد ، وهناك العديد من أنواع الماكينات المستخدمة في هذا الاختبار وأكثرها استعمالا هي الماكينة الهيدروليكية الموضحة في الشكل(3-21) . ويرتبط بالماكينة محرك متصل بذراع لوضع الحمل المطلوب تدريجيا على المبين ، والذي يوضع على سطح العينة النظيفة المستوية . ويجب أن لا يقل سمك العينة عن 10 أضعاف عمق العلامة (الأثر) . وهناك العديد من المبيئات أقطارها 1 mm , 2 , 5 , 10 كما أن الحمولة المستخدمة في هذه التجارب هي 3000,1500,500 kg ، ويتوقف اختيار أي منها على صلادة المادة قيد الاختبار .



الشكل (3- 21)

رسم تخطيطي لجهاز اختبار الصلادة

فمثلا عند إجراء اختبار صلادة الفولاذ تكون الحمولة 3000kg ، والقطر 10mm ، وتستمر فترة التحميل لمدة 15s فقط ، وبشكل عام فإن زمن التحميل لا يجب أن يتجاوز 10-15s في حالة السبائك الحديدية وفي حدود 30s في حالة السبائك غير الحديدية. وتتم قراءة الأثر على السطح بواسطة المجهر (الميكروسكوب) ، ويتم الحصول على رقم برينل للصلادة من العلاقة التالية :

$$\text{رقم برينل للصلادة} = \frac{\text{الحمل}}{\text{المساحة السطحية للخارق} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\text{مربع قطر الخارق}}{\text{مربع قطر الأثر}}} \right)}$$

أو يعبر عن رقم برينل للصلادة جبرياً كما يلي :

$$BHN = \frac{P}{\pi D^2 \left(1 - \sqrt{1 - d^2 / D^2} \right)} \dots\dots\dots (18 - 3)$$

حيث أن :

BHN : هو رقم برينل للصلادة.

P : هو الحمل بالكيلوجرام.

D : هو قطر الكرة المستعملة كخارق بالمليمتر.

d : هو قطر الأثر على سطح العينة بالمليمتر.

وعادة لا تستخدم هذه العلاقة للحصول على رقم برينل للصلادة ولكن غالبا ما تستخدم جداول الصلادة المدرجة في الملحق رقم 1 من هذا الكتاب والمستنبطة من مراجع عالمية لقياس رقم برينل ، ونلاحظ أن جداول الصلادة موضح بها الحمولة وقطر الكرة المستخدمين ، حيث يمكن قراءة الصلادة من تلك الجداول مباشرة .

ويستخدم اختبار برينل في قياس صلادة المواد المسامية مثل المسبوكات والمطروقات وحديد الإنشاءات ، ولا ينصح باستخدامه للمواد عالية الصلادة مثل الفولاذ المصلد بالتغليف . إن أهم شروط اختبار برينل للصلادة هي :

(a) يحتاج الاختبار إلى وقت طويل بالرغم من سهولة إجرائه .

(b) يجب أن يكون سطح العينة نظيفا ومستويا حتى تكون القراءة صحيحة .

(c) لا ينصح بإجراء الاختبار قرب طرف العينة وعدم أخذ قراءات متقاربة من بعضها البعض .

(d) يعطي هذا الاختبار دلالة قوية على الصلادة الداخلية للمادة أكثر من قراءة الصلادة للسطح فقط، ويرجع ذلك إلى عمق الأثر الذي يحدثه الاختبار.

(e) لا ينصح باستخدامه مع مادة رقيقة ، وكما ذكر فلا بد أن يكون السمك مساويا إلى عشرة أضعاف عمق الأثر . أن المثال (3-3) يوضح كيفية حساب (رقم برينل) للصلادة .

مثال (3-3)

عند إجراء اختبار برينل للصلادة على عينة من الفولاذ ، استخدمت كرة فولاذية قطرها 10mm ، وكان الحمل المستعمل 300kg ، وعند قياس قطر الأثر الناتج على السطح وجد أنه يساوي 3.5mm . من المعلومات المعطاة أوجد رقم برينل للصلادة لذلك النوع من الفولاذ .

الحل :

من علاقة الحمل وقطر الكرة المستخدمین وقطر الأثر على السطح يمكن حساب رقم برينل للصلادة من المعادلة رقم (3-18) حيث أن :

$$\text{الحمل} = P = 300\text{kg} .$$

$$\text{قطر الكرة} = D = 10\text{mm} .$$

$$\text{قطر الأثر} = d = 3.5\text{mm} .$$

$$\therefore BHN = \frac{P}{(\pi D^2)(1 - \sqrt{1 - d^2/D^2})} = \frac{300}{(\pi 10^2)(1 - \left[1 - \sqrt{1 - \frac{(3.5)^2}{(10)^2}}\right])} = 302$$

أي أن رقم برينل للصلادة لهذه المادة هو 302 .

2-3.7.3 اختبار فيكرز للصلادة (Vickers Hardness Test)

يستخدم مع هذا الاختبار مبيّن أو مخترق مصنوع من الماس قاعدته على شكل هرم ، والوجه الآخر بزاوية 136 درجة كما موضح في الشكل (3-22) ، ويقدر رقم الصلادة في هذه الحالة بقسمة الوزن المستخدم على مساحة أثر الهرم على السطح في المعادلة (3-19) .

رقم فيكرز للصلادة = $\frac{2 \times \text{الحمل المؤثر} \times \text{جا} (\text{نصف الزاوية بين وجهين متقاربين})}{\text{قطر الأثر}}$

أو جبرياً كالآتي :

$$VHN = \frac{2 P \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{d} \dots\dots\dots(19-3)$$

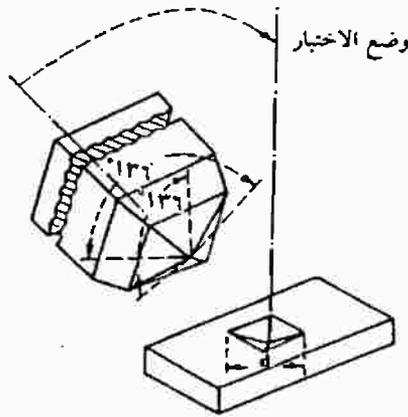
حيث أن :

VHN : رقم " فيكرز " للصلادة .

P : الحمولة المؤثرة بالكيلوجرام .

D : قطر الأثر .

α : الزاوية ما بين كل وجهين متقابلين من المخروط الماسي .



الشكل (22-3)

الهرم الماسي المستخدم في اختبار فيكرز

ويمكن في هذه الحالة الحصول على رقم الصلادة مباشرة من الجداول وتتبع الطريقة نفسها في اختبار برينل ، والمتمثلة في وضع الحمل على السطح حيث يتم التحميل بصورة ذاتية .

إن أهم مميزات اختبار فيكرز هي :

(a) يمكن تغيير مقدار الحمل المستخدم في الاختبار حسب نوع المادة ، ولذلك فإن طريقة الاختبار هذه تناسب مواد متنوعة ذات مدى واسع من الصلادة .

(b) القراءات أكثر دقة من اختبار برينل ، حيث لا يحدث الهرم الماسي تشوه في سطح المادة كما يحدث في كرات الفولاذ .

(c) يتم قراءة أبعاد الأثر بواسطة الميكروميتر المتصل بالميكروسكوب لذلك فإن القراءات ستكون أكثر دقة .

(d) لا بد أن يكون السطح نظيفا ومستويا وذلك للحصول على نتائج دقيقة وجيدة .

(e) يمكن تغيير الحمل ما بين 1g إلى 120g .

(f) يترك الحمل على سطح المادة لمدة 15 ثانية ويزال بعد ذلك ذاتيا .

(g) يستعمل هذا الاختبار للمواد عالية الصلادة والمواد الرقيقة على السواء نظرا لإمكانية تغيير الحمل .

والمثال التالي يوضح طريقة حساب رقم " فيكرز " لعينة من النحاس .

مثال (3 - 4)

عند إجراء اختبار الصلادة على عينة من النحاس ، استخدم جهاز فيكرز لقياس الصلادة ، وكانت الحمولة المستعملة في ذلك الاختبار 50kg ، وبلغ قطر الأثر على السطح 0.725mm . أوجد رقم (فيكرز) للصلادة .

الحل :

عند استخدام جهاز فيكرز لقياس الصلادة باستخدام الخادش الماسي ذي الشكل الهرمي حيث تبلغ الزاوية بين أوجهه 136 درجة ، فإن العلاقة بين رقم الصلادة والحمولة وزاوية الهرم هي :

$$VHN = \frac{2 P \sin(\alpha / 2)}{d}$$

حيث أن :

VHN : هو رقم فيكرز للصلادة .

P : هي الحمولة وتساوي 300kg .

A : هي الزاوية بين أوجه الهرم وتساوي 136 درجة .

d : هو قطر الأثر ويساوي 0.725mm .

$$\therefore VHN = \frac{2 \times 50 \sin\left(\frac{136}{2}\right)}{(0.725)} = 175$$

أي أن رقم فيكرز للصلادة لقطعة النحاس هو 175 .

3-3.7.3 اختبار روكويل للصلادة (Rockwell's Hardness Test)

تختلف طريقة تقدير الصلادة في هذا الاختبار عن الاختبارات السابقة ، فالصلادة هنا تعتمد على كل من عمق الأثر والسطح ، حيث تؤخذ القراءة لعمق الأثر وليس لمساحته السطحية كما مبين في الشكل (3-23) . وتتكون ماكينة الصلادة في هذه الحالة من حمولة يمكن إنزالها إلى سطح المادة مع مبيّن الصلادة وجهاز لإسناد العينة .

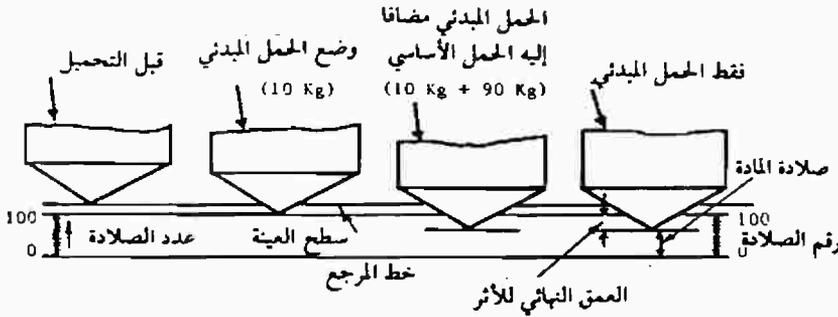
يتم أولاً وضع حمولة صغيرة بقيمة 10kg على السطح ، ثم يتم بعد ذلك إضافة حمولة أساسية وكبيرة بصورة ذاتية من خلال ذراع تحكم إلى أن يصبح الحمولة الكلية 100kg . أن الهدف من وضع الحمولة المبدئية هو لإزالة أي أثر أو عيب على السطح ، كما يسمح بالتعرف إلى الأثر المتروك على السطح بعد إبعاد الحمل الأساسي ، وهناك تدريجات مختلفة لقياس

الصلادة لهذا الاختبار ، كما يمكن استخدام أوزان مختلفة وكذلك مبيئات متنوعة الأقطار كما موضح في الجدول (3-3) . ويعد اختبار روكويل للصلادة الأكثر شيوعا واستعمالا لما له من ميزات عديدة منها :

(a) الاختبار سريع وسهل حيث تعطى القراءة مباشرة على مؤشر بالجهاز ولا يحتاج إلى علاقات رياضية أو الرجوع إلى كتيبات أو جداول أو غير ذلك .

(b) الصلادة مقسمة على التدرج بين الصفر إلى الـ 100 وحدة .

(c) له عدة تدرجات تصل إلى 15 تدرجا يمكن استخدامها حسب صلادة المادة ، ولكن أكثرها شيوعا هما التدرجان (B) و (C) ، ويرتبط التدرج (B) بالخارق الكروي أما التدرج (C) فيرتبط بالمخروط الماسي .
(d) يمكن قياس مدى واسع من الصلادة بتغيير الأوزان ونوع التدرج وكذلك مبيئات القراءات .



الشكل (23-3)

خطوات إجراء اختبار روكويل للصلادة

(e) نقل فرصة الخطأ حيث تكون القراءة مباشرة من مؤشر الجهاز ولا يحتاج الأمر إلى تحويلات أو الكشف في جداول .

(f) استخدام الحمل المبدئي يسمح باتصال جيد ما بين السطح والمبين ، وبهذا يلغي أي خطأ نتيجة عدم الاتصال الجيد مع السطح .

(g) يمكن استخدامه كأحد اختبارات الفحص غير المتلف للمنتج النهائي حيث أن هناك مبيئات صغيرة المساحة لا تظهر بصورة كبيرة على السطح ، ومن ثم لا تتلف السطح .

(h) للحصول على نتائج موثوق بها لا بد أن تؤخذ ثلاث قراءات متباعدة على الأقل عند السطح ثم يؤخذ معدل تلك القراءات .

(i) ينصح بمعايرة الأجهزة قبل دراسة صلادة المواد المطلوب اختبارها ، وذلك من خلال اختبار صلادة العينات القياسية مع الماكينة ومطابقتها مع النتائج القياسية وتضبط الماكينة تبعاً لذلك .

جدول (3-3) مقاييس روكويل للصلادة

المواد التي يستخدم معها	الشارق	الوزن (كجم)	تكرج الاختبار الأساسي
سبائك النحاس والفولاذ اللين والألمنيوم والحديد المطروق	كرة قطرها $\frac{1}{16}$ أنج	100	B
الفولاذ وحديد الزهر القاسي وحديد زهر البيرليت والفولاذ المصلد بالتنظيف وأي نوع من المواد صلابتها أكثر من 100	منشور بزاوية 120°	150	C
الكربيدات الأسمنتية وشرائح الفولاذ الرقيقة والفولاذ المصلد بالتنظيف لعق صغير.	منشور بزاوية 120°	60	A
رقائق الفولاذ المصلد بالتنظيف لعق متوسط وحديد زهر البيرليت	منشور بزاوية 120°	100	D
حديد الزهر وسبائك الألمنيوم والمغنيسيوم وفلزات المحامل.	كرة قطرها $\frac{1}{8}$ أنج	100	E
سبائك النحاس المدنة والصفائح الرقيقة من الفلزات اللينة.	كرة قطرها $\frac{1}{16}$ أنج	60	F

حديد الزهر المطروق وسبائك النحاس والنيكل.	كرة قطرها $\frac{1}{16}$ أنج	150	G
الألمنيوم والزنك والرصاص	كرة قطرها $\frac{1}{8}$ أنج	60	H
فلزات المحامل وأية فلزات أخرى وكذلك الصفائح الرقيقة منها	كرة قطرها $\frac{1}{8}$ أنج	150	K
ينصح باستخدام أصغر كرة وأقصى حمل لتجنب التأثيرات السندانية	كرة قطرها $\frac{1}{4}$ أنج	60	L
	كرة قطرها $\frac{1}{4}$ أنج	100	M
	كرة قطرها $\frac{1}{4}$ أنج	150	P
	كرة قطرها $\frac{1}{4}$ أنج	60	R
	كرة قطرها $\frac{1}{2}$ أنج	100	S
	كرة قطرها $\frac{1}{2}$ أنج	150	V

4-3.7.3 اختبارات الصلادة الدقيقة (Micro - Hardness Test)

تقوم اختبارات الصلادة الدقيقة على اختراق الجسم المختبر ، وتؤخذ قراءة الصلادة من قسمة الوزن المستخدم على مساحة الأثر ويستخدم في هذا الاختبار مبيّن هرمي ماسي زاويته 136 درجة. ويتم قراءة الأثر الحادث بواسطة الميكروميتر المتصل بالميكروسكوب الضوئي ذو قوة تكبير عالية حتى يمكن مشاهدة سطح العينة المختبرة وكذلك قراءة الأثر بدقة .

ومن أهم خواص هذا الاختبار ما يلي :

(a) يعد من الاختبارات المعملية التي تستخدم لأغراض البحث ، ولا يستخدم كثيرا لأغراض صناعية .

(b) يعطي نتائج ذات دقة متناهية ولهذا فهو يستخدم للمواد ذات الحساسية العالية مثل المغلفات والأفلام والرقائق وكذلك قياس صلادة الحبيبات أو المكونات المختلفة للسبائك .

(c) يستخدم في قياس صلادة المواد الرقيقة .

(d) يتطلب الاختبار أن يكون سطح العينة نظيفا ومستويا وناعما بل وينصح أن يكون مصقولا كذلك وفي بعض الأحيان يلزم نمش السطح قبل اختباره .

(e) يتراوح الحمل بين 1g إلى 1000g .

(f) يمكن استخدام هذه الطريقة في قياس صلادة الفلزات والبلاستيك والمواد السيراميكية .

3-7-3-5 كشف الصلادة النسبية (اسكليروسكوب)

إن الطرق الأربعة السابقة لقياس الصلادة هي طرق استاتيكية ، وتستخدم فيها خاصية مقاومة الاختراق ، أما بالنسبة لاختبار الصلادة الديناميكي الوحيد فهو " الاسكليروسكوب " . ولا يتم في هذا الاختبار قياس الأثر على سطح العينة المختبرة ، ولكن يتم قياس الطاقة الممتصة أثناء تصادم المبین الصلد مع سطح العينة . وتعتمد هذه الطريقة على مبدأ أن المادة اللينة تمتص قدرا من الطاقة أكبر من المادة الصلدة ، لذا فإن مسافة الارتداد ستكون أكبر في حالة المواد الصلدة . وفي حالة اختبار الاسكليروسكوب ، يتم سقوط مطرقة من ارتفاع معين على سطح عينة المادة محدثة أثرا صغيرا وترتد هذه المطرقة إلى جزء من ارتفاعها الأصلي نتيجة فقدان جزء من الطاقة في إحداث الأثر . وتختلف مسافة الارتداد حسب صلادة المادة ، فكلما زادت صلادة المادة كانت مسافة الارتداد أكبر لامتصاصها قدرا أقل من الطاقة من التي تمتصها المادة اللينة .

يمتاز جهاز اختبار الاسكليروسكوب بما يلي :

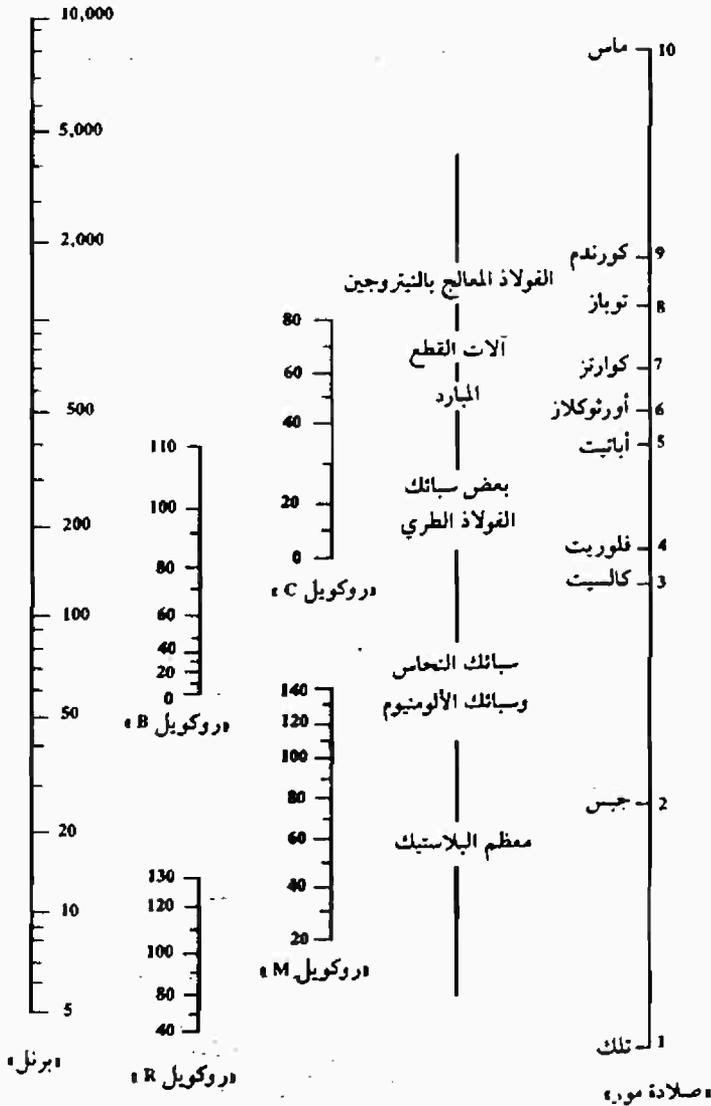
(1) سهولة الحركة والنقل ويمكن استخدامه في الاختبارات المعملية أو الحقلية .

(2) يمكن قياس صلادة قطع كبيرة في مواقعها دون الحاجة لنقلها وكذلك صلادة القطع الصغيرة .

(3) تعطى قراءة الصلادة مباشرة على قرص مدرج دون الحاجة إلى حسابات أو تحويلات وحدات أو استخدام جداول .

(4) يمكن قياس صلادة قطع رقيقة بسمك 0.005 بوصة .

يقدم الجدول (3-4) مقارنة بالتطبيقات المتنوعة لاختبارات الصلادة ، أما الشكل رقم (3-24) فيوضح المقارنة بين المقاييس المختلفة للصلادة .



الشكل (3-24)

مقارنة بين مختلف مقاييس الصلادة

جدول (4-3) : التطبيقات المتوقعة لاختبارات الصلادة المختلفة

الصلادة المقاسة	تجربتي	رؤيويون	برون
سطح مغطى سواء كان بفضة أو باستخدام الطلاء شرائح رقيقة جدا من المواد الفلزية تصل إلى سمك 0.001 أنج.	مثل اختبار روكويل ما عدا أنها تستخدم عندما يكون : - 1 - مطلوب قيمة صلادة لدرجة عالية من الدقة. 2 - إذا كان سمك الفلز والسبيكة الرقيقة هو أقل من 0.01 أنج إلى قيمة 0.005 أنج. 3 - منتج في صورته الإنتاجية. 4 - المنشآت الضعيفة.	الأجزاء المصنعة بصورة نهائية مثل : - لقم الارتكاز والصلامات والصلامولات والسمامير والدلائين والمجموعات المسننة والبكرات والسمامير اللولبية...إلخ. - أجهزة القطع مثل المنشار والسنكاكين ومنشار اليد والمقصات عدد التشكيل المسفات الصلدة النصبات وبعض المطروكات الصغيرة الألواح الفلزية الأسلاك السميكة التوصيلات الكهربائية أنواع الهلاستيك الكريباتك الأسمينية	منشآت الفولاذ وأي قطاعات مدلفنة مصطب المواد المصبووية بما في ذلك الفولاذ وحديد الزهر والألمنيوم وجميع المطروكات.
سطح مغطى سواء كان بفضة أو باستخدام الطلاء شرائح رقيقة جدا من المواد الفلزية تصل إلى سمك 0.001 أنج. دراسة كُدرج الصلادة في فلز وطبقة مغطى بها أو أكسيد أو أية معاملة أخرى. المنتجات ذات المساحة الصغيرة جدا كما في الساعات و حروف آلات القطع. المواد القصيفة أو القابلة للكسر كما في السليكون و الجرماتيوم و الزجاج. المواد المصنعة. محموق الفلزات. تقدير الصلادة للأوجه المختلفة في الفلز كل على حدة.			

6-3.7.3 العوامل المؤثرة على دقة قياس الصلادة

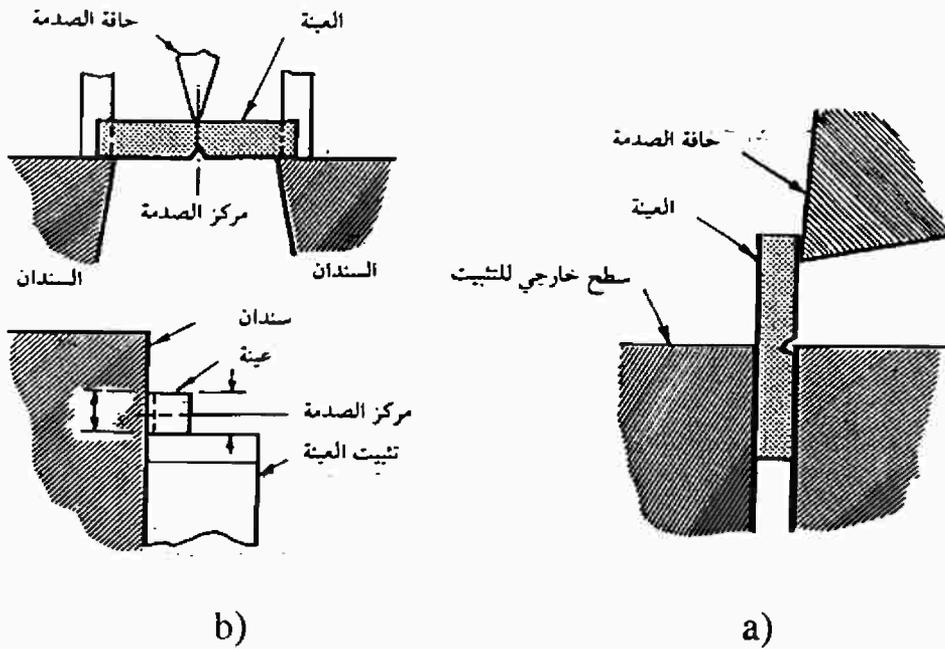
- تتأثر دقة الأثر (الحز) الذي يترك على سطح المادة المختبرة بأحد اختبارات الصلادة بالعوامل التالية :
- 1- دقة الحمل المستخدم .
 - 2- معدل وضع الحمل على السطح ، ولتلافي أي اختلاف في ذلك فهناك عامل تحكم أوتوماتيكي ينظم معدل تقديم الحمل إلى السطح و إزالته بعيدا عن السطح .
 - 3- الزمن الذي يسمح فيه ببقاء الحمل على سطح المادة وفي معظم التجارب وقد حدد بثلاثين ثانية يتم بعدها إزالة الحمل بصورة تلقائية .
 - 4- حالة المؤثر المستخدم وظروفه،ولسذا يجب المحافظة على الخادش الخارق (Indenter) ، والتأكد من عدم تعرضه للتلف وأن زوايا الهرم ما زالت كما هي ولم يحدث فيها أي تغيير .
 - 5- حالة الجزء الذي توضع عليه العينة ، يجب التأكد أنه في حالة أفقية وغير مائل لأي سبب .
 - 6- طريقة قياس أبعاد الأثر الذي ترك على السطح .
 - 7- سمك العينة حيث لا بد أن تكون العينة ذات سمك محدد وتختلف طريقة القياس على حساب السمك .
 - 8- طريقة تجهيز سطح العينة حيث يجب أن يكون السطح نظيفا ومصقولا ثم تجرى عملية نمش بعد ذلك .
 - 9 - شكل العينة حيث يفضل عدم قياس الصلادة عند الأطراف .
 - 10- موضع الأثر على السطح حيث يجب التأكد من أن الخارق موضوع في موقع لم يسبق له التأثير عليه .
 - 11- انتظام المادة من حيث التركيب الداخلي حيث تختلف الصلادة حسب الأوجه الداخلية للمادة .

4.7.3 اختبار الصدمات (Impact Test)

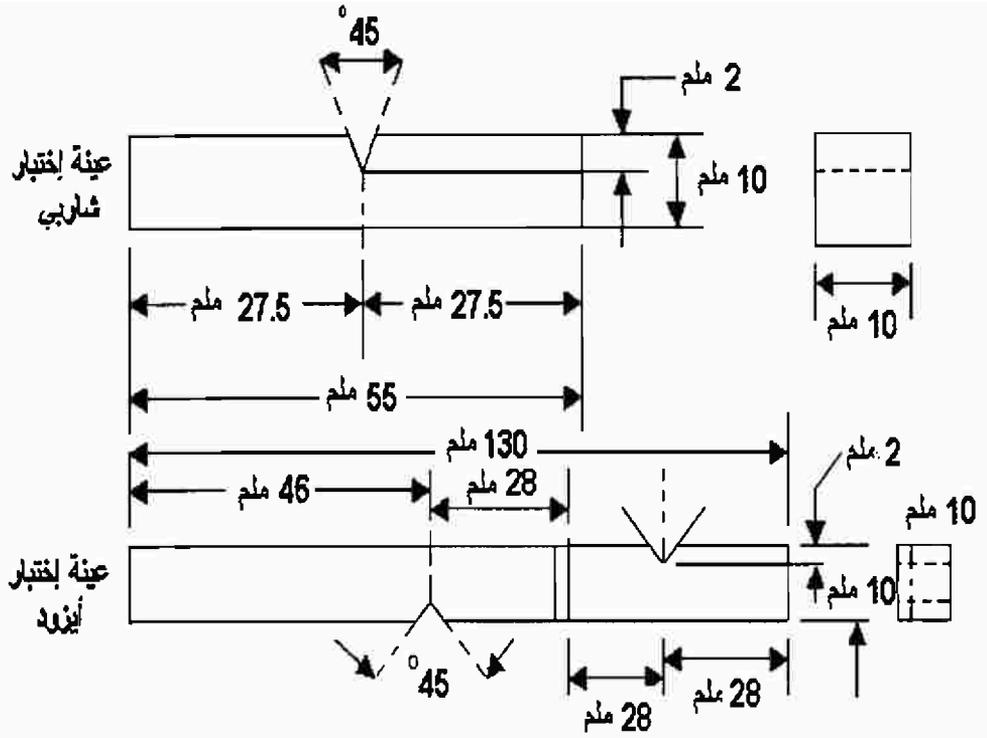
إن اختبار الصدمات هو الوسيلة لقياس مقاومة المادة لصدمات التحميل . وترجع أهمية هذا الإختبار إلى أنه الطريقة الوحيدة التي تقاس فيها المقاومة الديناميكية للمادة ، لأن الاختبارات الميكانيكية تقوم على أساس التحميل " الإستاتيكي " الساكن ، ولقد وجد أن هناك بعض المواد تقاوم بنجاح التحميل الإستاتيكي ، ولكنها تنهار مباشرة تحت الحمل الديناميكي كما هو الحال في الزجاج مثلا ، فالزجاج يستطيع أن يقاوم الشد والإنضغاط تحت تأثير حمولات كبيرة ولكنه يتحطم تحت أقل صدمة من المطرقة . وإضافة إلى الزجاج فهناك بعض المواد الأخرى التي تشاركه في هذه الخاصية ومنها حديد الزهر وبعض المواد البلاستيكية وبعض سبائك الفولاذ المحتوية على نسبة عالية من الكربون .

وهناك الكثير من الأجزاء الميكانيكية والإنشائية التي تتعرض فعليًا لحمولات ديناميكية (صدمة) ، مثل المسامير والمطارق والسندان وأعمدة الإدارة ومطارق الحدادة . إن التعريف المتداول بالنسبة لمقاومة الصدمات هو الطاقة المطلوبة لكسر حجم معين من المادة ، وكلما زادت الطاقة الممتصة زادت مقاومة المادة للصدمات . وتقاس وحدات هذا الإختبار (قدم- رطل) في النظام الإنجليزي أو (J/cm^2) في النظام المتري . أما في الوحدات العالمية فإنه ميجاباسكال. م⁻² والخاصية المرتبطة بهذا الإختبار هي الصلابة أو المتانة (toughness) ، وتعرف بأنها مقاومة المادة للكسر تحت حمل الصدمات ، وبالطبع فإن الفولاذ هو أكثر متانة أو صلابة من الزجاج . هناك نوعان من الاختبارات المعملية للصدمات هما اختبار أيزود (Izod) واختبار شاربي (Charpy) وأوجه الاختلاف بين الاختبارين هي على النحو التالي :

(a) مقدار طاقة الصدمة هي (120 قدم - باوند) لاختبار أيزود و(210 قدم - باوند) لاختبار شاربي .
 (b) طريقة تثبيت العينة حيث تثبت العينة كما موضح في شكل (3-25) ، ويكون التثبيت رأسيا" لاختبار أيزود وأفقيا" لاختبار شاربي .
 (c) أبعاد العينات القياسية تختلف أبعاد العينة في كلا الاختبارين ، وأطوال العينات المستخدمة في كلا الاختبارين موضحة في الشكل (3-26) .
 (d) أسلوب إحداث الصدمة على العينة حيث تتم الصدمة في اختبار أيزود في منطقة التلم بينما تكون الصدمة في اختبار شاربي في الإتجاه المضاد للتلم .
 (e) تستخدم طريقة أيزود في إختبار العينات عند درجات الحرارة العادية بينما يمكن إجراء اختبار شاربي عند درجات حرارة منخفضة (مثلا يتم تبريد العينة في النتروجين المسال) . وتستخدم هذه الطريقة بوجه خاص نظرا" لأنها سريعة ولا يستغرق تثبيت العينة فيها وقتا" طويلا" .



الشكل (3-25) طرق تثبيت العينات في اختبار الصدمات
 (a) تثبيت العينة في إختبار أيزود (b) تثبيت العينة في إختبار شاربي



الشكل (3-26): الأبعاد القياسية لعينة اختبار الصلابة

تجرى معظم اختبارات الصدمات على عينات مثلمة والغرض من ذلك هو تركيز الأجهادات على هذا الجزء من العينة ، حيث يمتص أكبر قدر من الطاقة في هذه المساحة وبالتالي يقع عندها الكسر . أي أن هذه الثلمة تساعد على تحويل المادة اللدنة إلى مادة قسيطة وبالتالي يمكن دراسة خاصية المتانة من خلال اختبار الصدمات ومن أهم العوامل المؤثرة على نتائج اختبار الصدمات ما يلي :

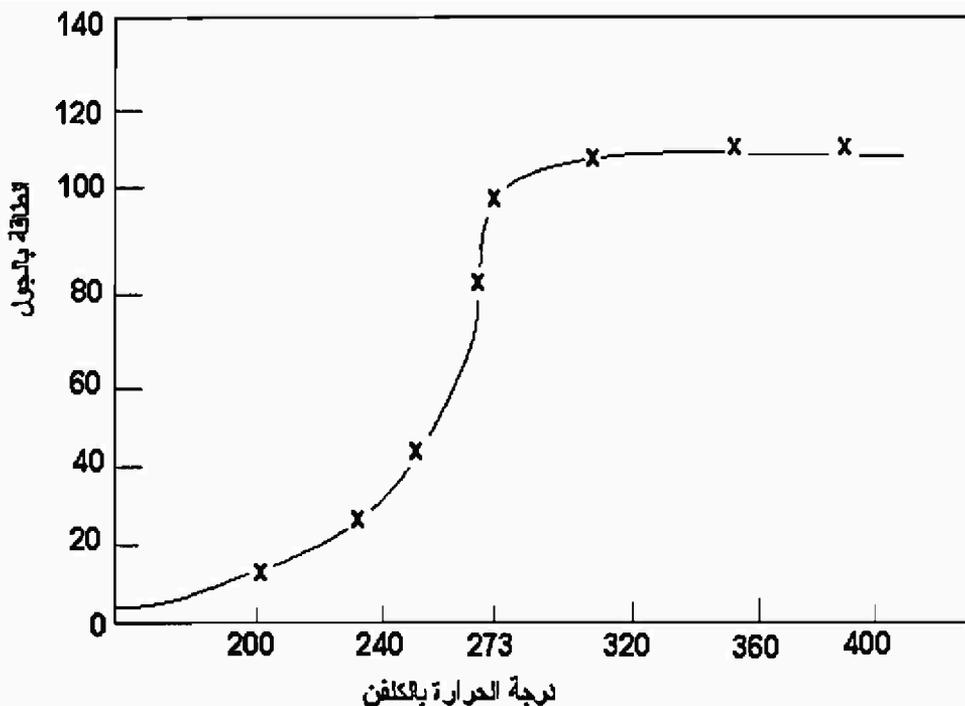
- 1- حجم الثلمة وشكلها حيث أن زيادة حجم الثلمة يقلل مقدار طاقة الكسر إلى حد كبير .
- 2- سرعة التحميل وقد وجد أن هناك درجة معينة (الدرجة الحرجة) من سرعة التحميل حيث تؤدي زيادة سرعة التحميل عن الدرجة الحرجة إلى تخفيض مقدار متانة المادة ، ولذلك فيجب أن يكون التحميل عند درجة أقل من النقطة الحرجة حتى لا تتأثر متانة المادة .

3- درجة حرارة العينة أن لدرجة الحرارة تسأثير كبير على مقدار المتانة وقد وجد أن انخفاض درجة الحرارة يقلل كثيرا من المتانة النسبية لهذه العينة كما هو واضح في الشكل(3-27) للفولاذ الطري .

4- هذا ولا يمكن استخدام نتائج إختبار الصدمات في أمور التصميم ومشكلاته ما لم يتم إختبار المادة عند ظروف مشابهة تماماً لظروف العمل والاستخدام .

ويستعمل هذا الاختبار أساساً كنوع من فرز المواد وقبولها لأغراض أو تطبيقات معينة ، وعلى الرغم من ذلك فإن إختبار شاربي يمكن أن يعطي فكرة مبدئية عن تصرفات الفولاذ عند درجات حرارة بين - 40 إلى + 500 درجة مئوية . وطبقاً للمواصفات القياسية الأمريكية ، عند تقديم تقرير عن إختبار الصدمات للمواد لا بد وأن يشمل التقرير النقاط التالية :

- (a) نوع الماكينة المستخدمة في الاختبار .
- (b) مواصفات العينة المستعملة من حيث الحجم والأبعاد وموضع الثلمة .
- (c) سرعة الصدمة .
- (d) الطاقة المفقودة في الاحتكاك وطاقة كسر العينة .
- (e) درجة حرارة العينة .
- (f) الطاقة الممتصة من العينة (القيمة الفعلية لمتانة العينة) .
- (g) نوع الكسر وموضعه .
- (h) عدد العينات التي لم تتكسر عند قيمة المتانة الفعلية .



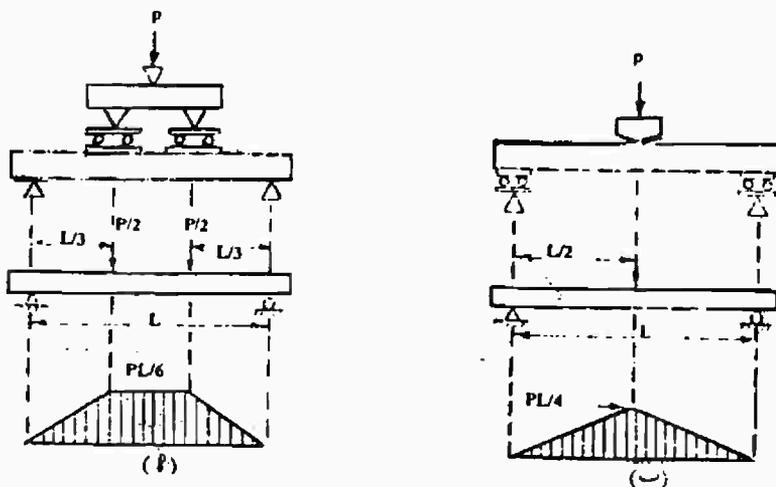
الشكل (27-3) تأثير درجة الحرارة على طاقة الصدمة لتفولان نظري

5. 7. 3 إختبار الانحناء " الثني " (Bending Test)

تتعرض أجزاء كثيرة من المنشآت مثل العتبات والأعمدة والأرضيات وأجزاء من الماكينات والمعدات مثل عمود الإدارة وقاعدة الماكينات والهيكل الفلزية لعمليات ثني ، أي أن هناك أجزاء كثيرة من المنشآت والمعدات التي تتعرض جهة منها لإجهادات الشد بينما تكون الجهة الأخرى معرضة لإجهادات الإنضغاط ، ولمعرفة تصرف أي مادة تحت ظروف العمل الفعلي تجرى عليها اختبارات قياسية لتقدير مقاومتها للثني ، وجميع المواد سواء القصيف منها أو المطيل مثل الفلزات والخرسانة والخشب والبلاستيك والطوب وأحجار البناء والجبس يجرى عليها هذا الاختبار . ويهدف إختبار الإنحناء على المواد إلى دراسة ظروفها التصميمية أكثر من الحصول على معلومات عن خواص المادة .

يتم إجراء الاختبار باستخدام الماكينات متعددة الأغراض المستعملة في اختبارات الشد والإنضغاط . إن العينات المستخدمة في اختبار الإنحناء هي عينات ذات مقطع دائري أو مستطيل . ويتم تثبيت العينات أفقياً على بكرات بين الفكين العلوي والسفلي ، ثم ينزل الحمل تدريجياً ويتم قراءة الانحراف الحادث بمقياس مناسب .

وهناك طرق مختلفة للتحميل أكثرها استعمالاً المبين في الشكل (28-3) وفي كلا الحالتين ، يكون توزيع الأجهادات الناتجة مختلفاً كما هو واضح في الشكل (28-3) . وينتج عن الحمل المؤثر إجهادات إنضغاط في الجزء العلوي وإجهادات شد في الجزء السفلي . ويختلف أقصى إجهاد انحناء للمادة تبعاً لنوع المقطع ، ولقد وضعت العلاقتان التاليتان للحصول على قيمة الأجهادات تبعاً لنوع المقطع :



الشكل (28-3)

توزيع عزوم الانحناء في القضيب المعرض للأحمال
 (أ) حمل مؤثر في نقطتي الثلث من القضيب (ب) حمل مؤثر في منتصف
 القضيب

(أ) عينة مستطيلة المقطع : أقصى إجهاد إنحناء = $\frac{6 \times \text{عزم الإنحناء}}{\text{عرض العينة} \times \text{مربع سمك العينة}}$ (20-3)

$$\text{أو } \sigma = \frac{6M}{bd^2} \dots\dots(20-3)$$

(ب) عينة دائرية المقطع :

أقصى إجهاد إنحناء = $\frac{32 \times \text{عزم الإنحناء}}{3 \times (\text{قطر العينة})^3}$ (21-3)

$$\text{أو } \sigma = \frac{32M}{d^3} \dots\dots(21-3)$$

حيث أن :

σ : أقصى إجهاد انحناء psi .

M : عزم الإنحناء (بوصة - رطل) .

b : عرض العينة المستطيلة .

d : سمك العينة المستطيلة ، أو قطر العينة الدائرية .

وعندما يكون عزم الإنحناء عند أقصى قيمة فإن إجهاد الإنحناء (σ) يعرف باسم الإجهاد الأقصى أو معامل الكسر . ويمكن الحصول على الإجهاد الأقصى أو معامل الكسر بقياس الانحراف الحادث في العينة ، وكذلك حساب الحمل عند هذه النقطة ويعتمد الإجهاد الأقصى أو معامل كسر العينة على العوامل التالية :

- 1- حجم العينة وشكلها .
- 2- نوعية التحميل حيث يؤثر ذلك على عزم الإنحناء كما سبق ذكره .

كما تنهار المادة أو تفشل في أحد الصور الثلاث التالية :

(a) انهيار الخضوع حيث تفشل الألياف الخارجية للمادة المتأثرة بحمل الشد ويكون الانهيار في شكله العام شبيهاً بانهيار المادة تحت تأثير أحمال الشد .

(b) انهيار التحديب يشبه الانهيار في هذه الحالة انهيار الإنضغاط وغالباً يحدث ذلك في المواد الضعيفة .

(c) انهيار القص يحدث الانهيار أساساً عند نقطة التحميل نظراً لتركيز الحمل عند هذه النقطة .

وتنص المواصفات العالمية لأبعاد العينات المستخدمة في هذا الاختبار ، على عينات الطوب $8 \times 2 \times 2 \text{ in}^3$ ويتم اختيارها أفقياً على باع قدره 7 in ، أما أبعاد عينات الخشب فهي $30 \times 2 \times 2 \text{ in}^3$ ، ويكون التحميل في منتصف المسافة وباع الاختبار هو 28 in ، أما عينات الخرسانة فتعتمد أبعادها على حجم الركام المستخدم . فعندما يصل حجم الركام إلى 1.5 in ، فإن أبعاد العينة $18 \times 6 \times 6 \text{ in}^3$ ، وإذا زاد حجم الركام إلى 2.5 in فيصبح حجم العينة $24 \times 6 \times 6 \text{ in}^3$.

يتم الاختبار بوضع الحمل في ثلث المسافة وهناك بعض النقاط المهمة عن إختبار الإنحناء يمكن إيجازها على النحو التالي :

(a) يجرى الاختبار عند درجة حرارة الغرفة .

(b) يمكن من هذا الاختبار الحصول على مقاومة الشد لبعض المواد التي يصعب قياس مقاومتها مباشرة من اختبارات الشد ويأتي الخشب على رأس قائمة هذه المواد .

(c) تستخدم العينات المستطيلة المقطع للمواد غير الفلزية والمقطع الدائري للمواد الفلزية كما في إختبار حديد الزهر والفولاذ .

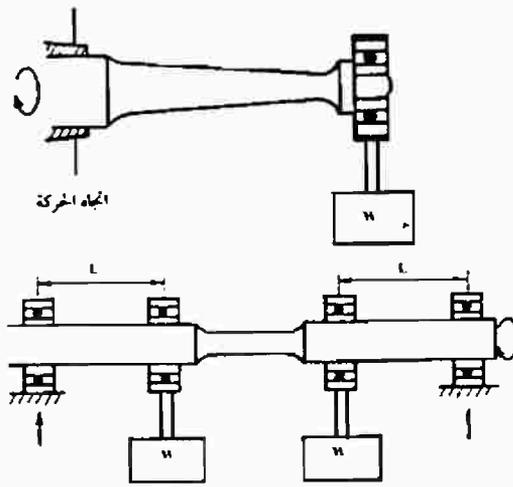
6.7.3 اختبار الكلال (Fatigue Test)

يسبب الكلال أكثر من 80 إلى 90 % من انهيار الأجزاء المتحركة عند سرعات عالية والعاملة في الماكينات والأجهزة ، ويرجع انهيار هذه الأجزاء إلى تعرضها إلى الأحمال المتكررة أي إلى تكرار التعرض للإجهادات . تهدف إختبارات الكلال إلى توفير بيانات والحصول على معلومات كافية عن تصرف المواد تحت الأجهادات المتكررة بشكل متقطع أو دوري . وتستخدم المعلومات المحصل عليها من اختبار الكلال على وجه خاص في مسائل التصميم للأجزاء المختلفة من الماكينات والإنشاءات . ويستخدم هذا الاختبار بشكل رئيسي في دراسة تصرفات أجزاء الماكينات مثل عمود الإنارة والمسامير والصمامات والزنبرك المعلق ، وأجزاء من الطائرات النفاثة وقضبان السكك الحديدية والقاطرات وأجزاء الجسور وغيرها .

وهناك حد أقصى للإجهاد الذي يمكن أن تعمل عنده المواد لفترات طويلة " إلى أجل مسمى " دون انهيارها ويعرف هذا القدر من الأجهادات باسم حد الإطاقة أو حد الإكلال . وتكون الأجهادات المتكررة التي تتعرض لها المادة إما أحادية النوع أو خليط من الأجهادات ، الانحناء (bending) ، الالتواء (twist) أو المحورية (axial) . وتختلف الماكينة المستخدمة للإختبار تبعا لنوع التحميل وتتكون معظم ماكينات إختبار الكلال من:

1. جزء خاص بأسلوب التحميل حيث يمكن أن يكون الثقل ساكناً ، أو يمكن تعديله لتثبيت الحمل المستخدم ، وغالبا ما يتم حساب الأجهادات المستخدمة أو قراءتها من الانفعال الحادث للمادة .
2. عدة تدريجات لقياس الأحمال والقوى المؤثرة .
3. عدادات إلكترونية للتحكم في سرعة التحميل ونوعها وكذلك قراءة النتائج .

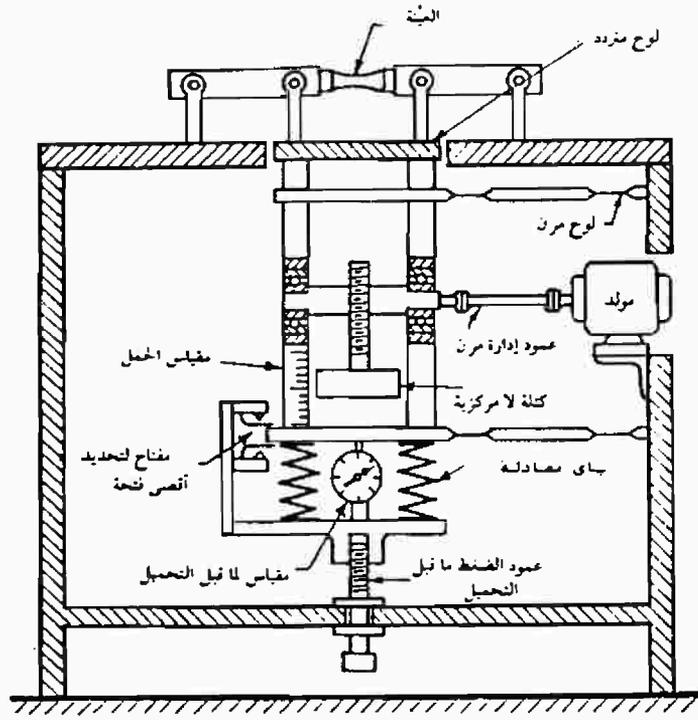
توجد ماكينات بسيطة وسهلة العمل تستخدم في المعامل كما موضح في الشكل رقم (29-3) ، وهي عبارة عن عمود إدارة يحرك العينة مغيرا وضعها بين إجهادات الشد وإجهادات الإنضغاط ، ويعيب هذه الماكينة تركيز الأجهادات القصوى على جزء قصير من العينة بالقرب من نقطة الاتصال ، وهناك نوع آخر يسمّى الماكينات المركبة وهذا النوع من الماكينات مبين في الشكل (30-3) .



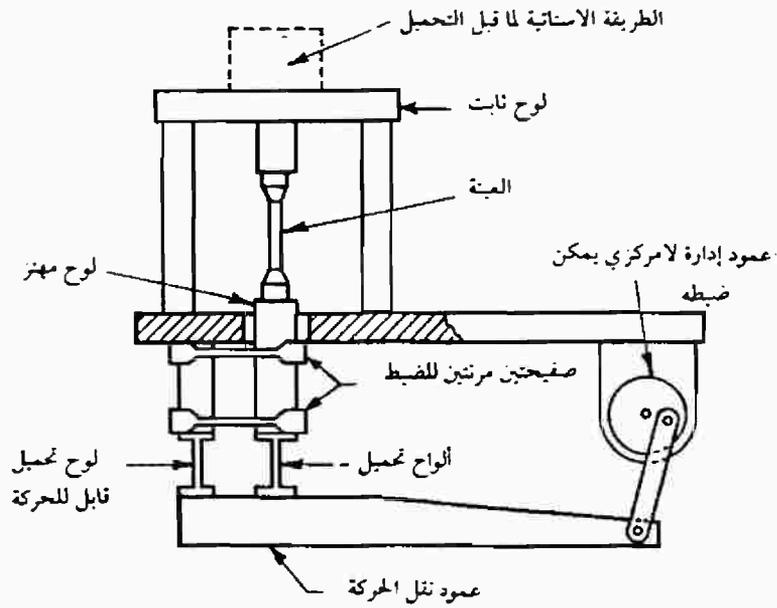
الشكل (3 - 29)

شكل تخطيطي لماكينة إختبار الكلال

في أي نوع من ماكينات الاختبار سواء كانت بسيطة أو مركبة يتم استخدام عينة مدورة أو مسطحة ، ولكن يلزم أن تكون العينة على درجة عالية من جودة التجهيز (finishing) نظرا لتأثر حد الإطاقة الناتج من إختبار الكلال بخشونة السطح كما هو مبين في كل من الجدول(3-5) ، والشكل(3-31) حيث تقلل الخشونة من مقاومة المادة للكلال .



(a) ماكينة اختبار الكلال من نوع الشني ثابتة الأجهاد



(b) ماكينة اختبار الإجهاد ثابتة التردد

الشكل (30-3)

جدول (3 - 5)

تأثير طريقة تجهيز السطح على حد الكلال

حد الإطاقة		الخشونة الداخلية (ميكروبوصة)	نوع تجهيز السطح
MPa	Psi		
637	91,000	25 - 16	شحذ دائري
733	104,700	20 - 12	شحذ بالتحضين
784	112,000	12 - 8	شحذ طولي
798	114,000	6 - 2	صقل جيد
817	116,750	2 - 0.5	صقل ممتاز

بالإضافة إلى خشونة السطح فهناك عوامل أخرى تؤثر على مقاومة المادة للكلال من أهمها ما يلي :

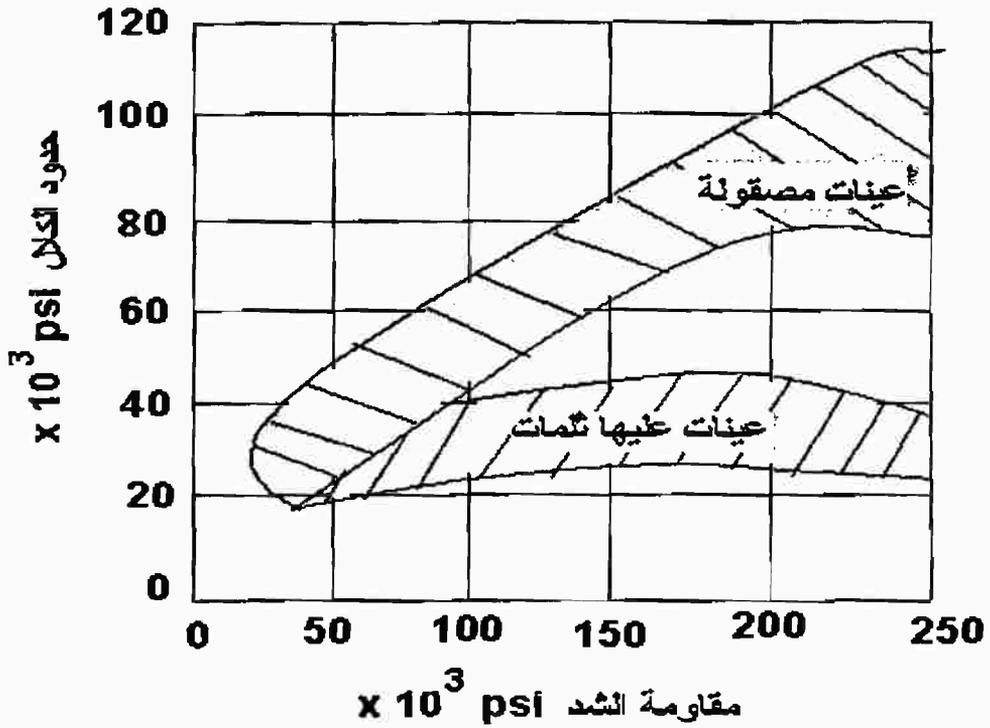
- 1- تركيب وبنية المادة ، حيث وجد أن إضافة بعض عناصر السبيكة إلى الفلز سوف تحسن من مقاومته للكلال .
- 2- عمليات التصنيع ، على سبيل المثال المعالجة الحرارية والتشكيل على البارد ، فقد وجد أن نسبة معينة من المعالجة الحرارية والتشكيل على البارد للسبائك المختلفة تحسن كثيرا من مقاومة المادة للكلال .
- 3- درجة الحرارة .
- 4- حجم العينة .
- 5- مقدار الإجهاد المؤثر على المادة ، فإذا زاد الإجهاد المؤثر قل عدد الدورات التي تتكسر عندها المادة .

إن أهم خاصية يتم قياسها بهذا الاختبار هي حد الكلال ، ويتم ذلك بتقدير متوسط قيمة الأجهادات القصوى وعدد الدورات التي يتم عندها انهيار عدد من

العينات ، وتمثل هذه القيم بيانياً بما يعرف باسم الإجهاد - عدد الدورات (S-N diagram) ، حيث أن :

S : تمثل الأجهادات المؤثرة psi أو (N/mm^2) .

N : تمثل عدد الدورات التي تنهار عندها المادة .



الشكل (3-31): حدود الإطاقة لإختبار الكلال وعلاقته بمقاومة الشد لعينات مصقولة وعينات بها ثلمات

ويتم تكرار هذا الاختبار عند إجهادات مختلفة حتى لا تكسر العينة مهما كان عدد الدورات المستخدمة ، وفي أغلب الأحوال فإن الاختبار الذي لا تفشل فيه العينة حتى " $10^6 \times 10$ " دورة يعد عمراً لا نهائياً ، ويعتبر هو حد الكلال (حد الإطاقة) . وإجهاد التصميم في إختبار الكلال يقل كثيراً عن الأجهادات التي يسح بها إختبار الشد ، فقد تصل حدود الإطاقة في الكلال إلى 50% من إجهاد الشد ، ويظهر لكثير من المواد مثل الحديد ، والفولاذ

الطري ، وسبائك الألمنيوم وسبائك التيتانيوم والمغنيسيوم حدود إاطاقة بينما هناك مواد أخرى كثيرة تفشل في إظهار حد الإاطاقة وفيما يلي بعض النقاط المهمة عن إختبار الكلال :

1. هذا النوع من الاختبارات عالي الكلفة بسبب نوع الماكينة المطلوبة والوقت المستغرق لإجراء تجربة واحدة .
2. يحتاج إلى عدد كبير من العينات والتقديرات الإحصائية فلا يكفي بعينة أو عينتين ولكن تصل أعداد العينات المختبرة في بعض الأحيان إلى عشر عينات للإختبار الواحد .
3. تعد النتائج التي يتم الحصول عليها في غاية الأهمية في عمليات التصميم وذلك نظرا لأن إنهيار الكلال يكون فجائيا وبدون سابق إنذار ، ولذا يجب تجنبه بأي صورة . وحد الإاطاقة في الغالب أكثر أهمية من نقطة الخضوع ، وخاصة للأجزاء المعرضة للإجهادات الترددية حيث إن التحميل الترددي والدوري له تأثير كبير على نقص الإجهاد المسموح به والذي يمكن أن تتحمله المادة .
4. لا يدخل في إختبار الكلال المواد السيراميكية نظرا لضعفها الشديد ولكن البلاستيك من المواد التي درست ويقاس لها حدود الإاطاقة باختبار الكلال .

ولخطورة إنهيار الكلال وأهمية مقاومته نذكر هنا بعض النقاط التي يمكن أن تساعد على تحسين مقاومة إنهيار الكلال :

1. تجهيز السطح بصورة جيدة جدا ومحاولة إزالة أي خشونة أو خدوش ميكروسكوبية في المادة ، حيث إن ذلك يساعد على رفع مقاومة الكلال . ولقد وجد أن السطح ذو النعومة العالية والمصقول كهروكيميائيا يقاوم لفترات طويلة جدا إنهيار الكلال مقارنة بالأسطح الخشنة كما هو مبين في الجدول (3 - 5) .

2. تجنب النقط اللينة نظرا لوقوع الإنهيارات في تلك النقط .

3. تعديل تصميم الأجهزة والمعدات والمنشآت لمنع تركيز الأجهادات في نقطة أو مساحة ، وذلك من خلال زيادة أقطار الانحناءات والأركان ، وبذلك يكون الإجهاد موزعا على مساحة كبيرة ويقلل ذلك من مقدار الإجهاد المعرضة له المادة .

4. معالجة سطوح الفلزات والسبائك للوصول إلى درجة عالية من الصلادة من خلال المعالجة الميكانيكية . التشكيل على البارد أو الطرق أو كلاهما والتي ينتج عنها التصلد بالإنفعال . إن المثال الآتي يوضح طريقة تحديد حد الإطاقة عند معرفة الأجهادات القصوى .

مثال (3-5)

عند إجراء اختبار الكلال على بعض سبائك الفولاذ ، تم تسجيل كل من مقدار أقصى إجهاد مع عدد الدورات التي تم عندها الكسر وكانت النتائج كما موضح في جدول رقم (3 - 6) ، والمطلوب هو :

(a) رسم العلاقة (S-N) لأنواع الفولاذ المختلفة .

(b) تحديد مقدار حد الإطاقة لكل نوع من أنواع الفولاذ .

الجدول (3-16) أقصى إجهاد مع عدد الدورات لكسر الفولاذ

فولاذ الإنشاءات		فولاذ كربوني 53%		فولاذ كربوني 53% (كروم - نيكل)		فولاذ كربوني بارد	
عدد الدورات	الإجهاد	عدد الدورات	الإجهاد	عدد الدورات	الإجهاد	عدد الدورات	الإجهاد
$N \times 10^7$	$Psix10^3$ MPa	$N \times 10^7$	$Psix10^3$ MPa	$N \times 10^7$	$Psix10^3$ MPa	$N \times 10^7$	$Psix10^3$ MPa
0.003	45	0.02	58	0.004	95	0.004	100
0.006	43	0.03	57	0.006	86	0.008	97
0.02	35	0.04	56	0.02	75	0.015	95
0.1	30	0.08	55	0.03	73	0.03	90
0.15	29	0.1	54	0.1	67	1	90
0.5	28	0.2	53	1	66	10	90
1	28	1	53	5	65	10	90
00	28	5	53	10	65		
		00	53	00	65		

الحل :

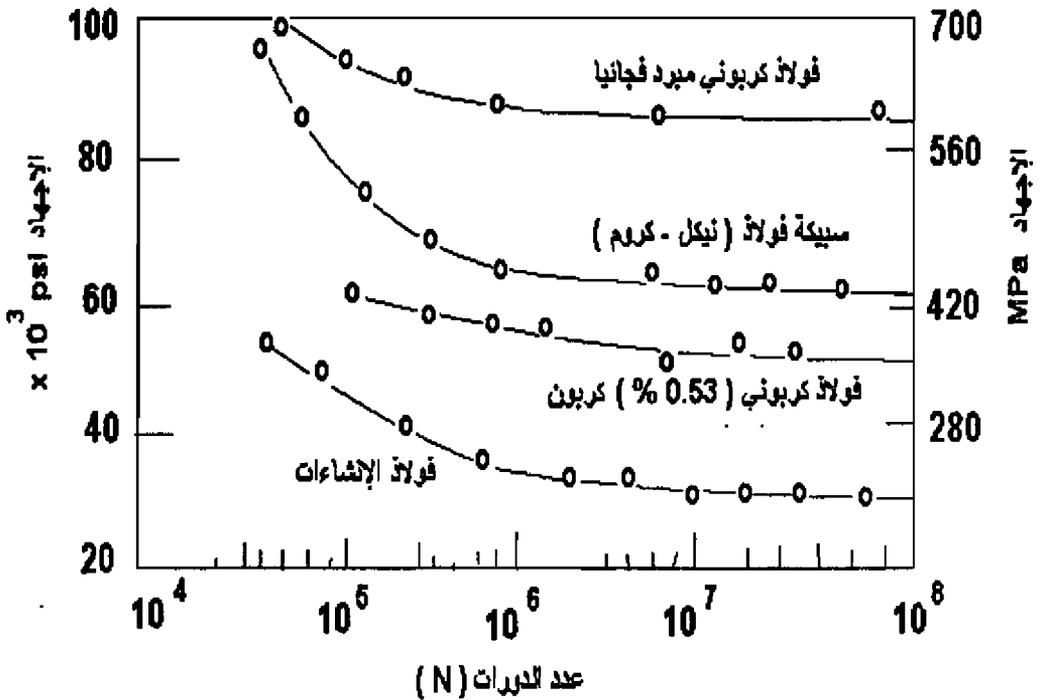
(a) علاقة الإجهاد - عدد الدورات موضحة في الشكل (3-32) .

(b) حد الكلال لأنواع الفولاذ موضح في الجدول (3-7) .

الجدول (7-3)

حد الكلال لعدد من أنواع الفولاذ

حد الإطاقة		المادة
ميغاباسكال	باوند / أنج مربع	
630	90,000	فولاذ كربوني مبرد فجائياً
455	65,000	سبيكة فولاذ (نيكل - كروم)
371	53,000	فولاذ كربوني (0.53%)
196	28,000	فولاذ الإنشاءات



الشكل (3 - 32) : العلاقة بين عدد دورات والإجهاد في اختبارات الكلال للمثال (5-3)

7.7.3 اختبار الزحف (Creep Test)

يسبب ارتفاع درجة الحرارة في انخفاض قيم إجهاد الخضوع ومقاومة المادة للشد ، وبالتالي تصبح عملية تشكيل المادة الفلزية أكثر سهولة ، وهكذا يؤدي استعمال المادة عند درجات الحرارة العالية لفترات قصيرة تحت ظروف الشد إلى مشكلات خطيرة في التصميم ، حيث لن يستمر تأثير الانفعال عند درجة الحرارة العالية من خلال تشكيل المادة فحسب ، بل يعمل على خفض مقاومة المادة للشد بالمعدل نفسه الذي يقل به الانفعال ويمكن ملاحظة ذلك من الشكل (3-33) .

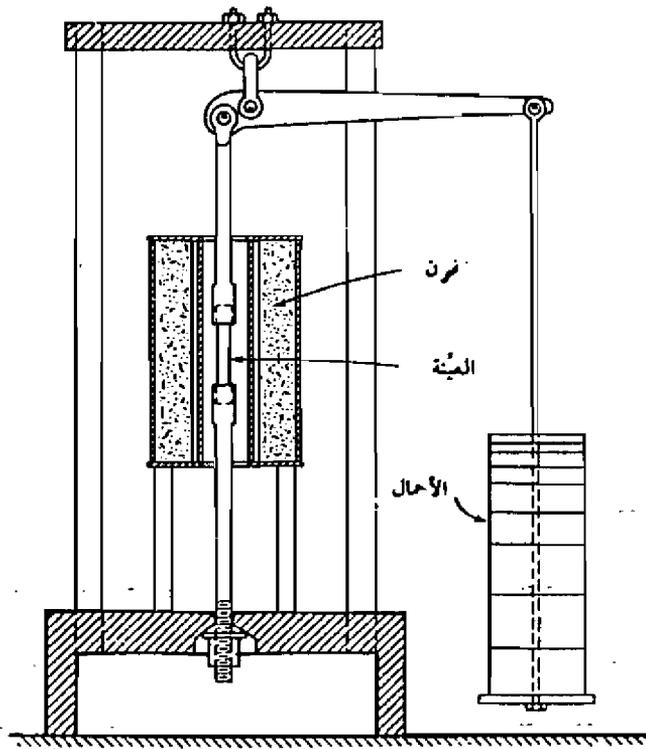


الشكل (3-33) منحنيات الزحف لسبيكة الفولاذ " N-155 " منخفض الكربون بعد الطرق عند درجة حرارة 650c°

وتحدث الظاهرة نفسها عند درجة الحرارة العادية فقد وجد أن تجاوز الحمل لنقطة الخضوع يجعل الفلز يستمر في التشكيل لفترة طويلة حتى بعد إزاحة هذا الحمل . وعلى هذا الأساس تتم الاستطالة الصغيرة الحادثة من تأثير عاملين هما درجة الحرارة والحمل ويعرف باسم الزحف .

لقد تم الاهتمام بهذه الخاصية وتطوير السبائك المناسبة لمقاومة الزحف بعد تزايد الحاجة إلى مواد تعمل عند درجات الحرارة العالية كما في محطات القوى " محطات البخار " والصناعات الكيماوية " الغلايات " ، ولقد زادت الحاجة إلى تطوير سبائك أكثر مقاومة للزحف في الفترة الراهنة نظرا للتطور الكبير في الطائرات التي هي أسرع من الصوت ، والصواريخ المختلفة إضافة إلى ذلك فقد ظهرت مشاكل زحف المواد في المفاعلات النووية وبخاصة في عناصر الوقود . ويبين كل ذلك أهمية إختبار المواد والحصول على معلومات عن مقاومتها للزحف قبل الاستخدام .

تقوم اختبارات الزحف على أساس إختبار تصرفات المادة تحت تأثير درجات الحرارة العالية تحت ظروف إجهادات الاستعمال الثابتة . ويستخدم لهذا الإختبار ماكينات خاصة كما موضح في الشكل (3-34) .



الشكل (3-34)

جهاز التحميل في إختبارات الزحف

ويمكن أن نلخص بعض النقاط المهمة بالنسبة لاختبارات الزحف وتصرفات المواد تحت ظروف الزحف وكذلك المعلومات المحصل عليها وكيفية تفسيرها فيما يلي :

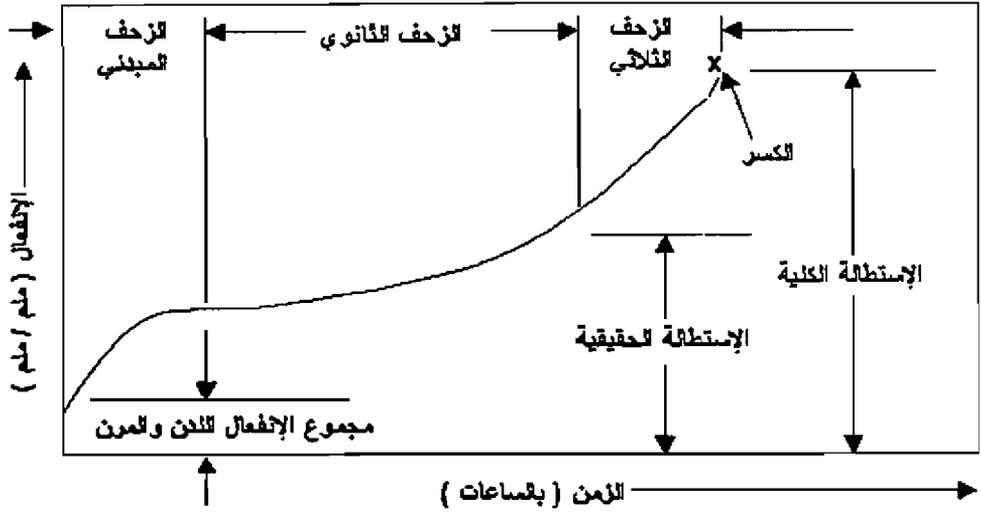
1- لا بد من إجراء الاختبار لفترة طويلة وعدم الاعتماد على نتائج الاختبارات لفترات زمنية قصيرة مع محاولة مد المنحنى خارجا للحصول على معلومات لأزمنة أطول ، لأن ذلك لا يمثل طبيعة تصرف المادة ولا يعبر عن القيم الحقيقية لمقاومة المادة للزحف .

2- في أمور التصميم ، لا بد من الاعتماد على نتائج تجارب الفترة الزمنية الطويلة ، وعدم الأخذ بالنظر اختبارات الأزمنة القصيرة ، حيث أن هناك تغيرات داخلية تحدث في المادة مع الزمن ولا يمكن التنبؤ بها من المنحنيات . ولكن في حالة استخدام الاختبار لتطوير السبائك فيمكن عندئذ الاعتماد على الاختبارات قصيرة الزمن .

3- يتم في إختبارات الزحف تحميل الشد في اتجاه محوري في الفرن ، ولا بد أن تكون درجات الحرارة مضبوطة بدقة كبيرة . كما يجب أن تكون أجهزة قراءة الاستطالة على أعلى درجة من الحساسية وفي حدود $10^8 \times$ انفعال/ساعة نظرا لأن مقدار الانفعال في هذه الحالات صغير جدا .

4- عند ذكر نتائج إختبارات الزحف يجب إيضاح درجة الحرارة التي تم إجراء الاختبار عندها نظرا لأن خاصية الزحف تعتمد كليا على درجة الحرارة .

5- يتكون منحنى الزحف للمواد الفلزية كما مبين في الشكل (3-35) من ثلاث مناطق أساسية :



الشكل (3-35): المناطق الرئيسية الثلاث في منحنى الزحف

(a) المنطقة الأولى تدعى منطقة الزحف المبدئي أو العابر وفيها يقل معدل الزحف إلى قيمة معينة اعتمادا على الإجهاد المستخدم .
 (b) المنطقة الثانية الزحف الثانوي أو الزحف الثابت وهو المرحلة التالية للزحف المبدئي حيث يثبت معدل الزحف في هذه المرحلة لفترة طويلة .
 (c) المنطقة الثالثة تمثل المرحلة الثلاثية للزحف وهي المرحلة الأخيرة في المنحنى ، وفيها يزيد معدل الزحف كثيرا حتى ينكسر الفلز . وفي هذه المرحلة يكون معدل التشكيل اللدن سريعا جدا ويتم فيها تخفيض سريع وكبير لمساحة المقطع ، مما ينتج عنه زيادة في الأجهادات ، بينما تكون الحمولة ثابتة ، من خلال إنقاص الحمل (نظرا لتغيير مساحة المقطع) فإن الانفعال يظل ثابتا حتى النقطة الأخيرة للانقياس .

6- خاصية الزحف ليست من الأساسيات (أي أنها غير مؤثرة كثيرا) بالنسبة للفلزات الحديدية ، إلا إذا استخدمت عند درجة حرارة أعلى من 425°C .

7- تعد خاصية الزحف مهمة جدا في اختبار المواد ذات نقطة الانصهار المنخفضة ، كذلك في المواد البلاستيكية والأنابيب المغلقة بمادة

الإيبوكسي (epoxy) . حيث تشكل تلك المادة نقطة الضعف في وصل الأنابيب معا .

8- يجب إجراء إختبار الزحف على الفلزات والسبائك والمواد السيراميكية التي ستستخدم عند درجات الحرارة العالية للتأكد من خواصها تحت هذه الظروف .

9- توجد ثلاثة أنواع من الزحف اعتمادا على درجة الحرارة هي :

(a) الزحف اللوغاريتمي ، ويظهر عند درجة الحرارة المنخفضة وفيها يقل معدل الزحف مع الوقت .

(b) زحف الإفائة ، وهذا الزحف يحدث عند درجات حرارة متوسطة أقل من نصف درجة حرارة انصهار المادة ، ولا يقل فيه معدل الزحف بنفس نقص المعدل الذي يحصل عند درجات الحرارة المنخفضة .

(c) زحف الإنتشار ، يحدث ذلك عند درجات الحرارة العالية والتي تصل إلى نصف درجة حرارة انصهار المادة أو أعلى ، ويتأثر الزحف هنا بمعامل الإنتشار أكثر من تأثره بالإجهادات .

10- أفضل السبائك المستخدمة في ظروف الزحف ومقاومة الانهيار هي :

(a) سبائك الساب (SAP) وهناك عدة تركيبات منها مثل :

$Cu - Al_2O_3$ و $Cr - Al_2O_3 - Cu - SiO_2$

(b) سبائك كل من النيمونيك (nimonic) والإنكونيل (inconel) ، وهي أساسا سبائك النيكل مع الكروم والكوبالت للأولى والكروم فقط للثانية .

(c) سبائك مختلفة من الفولاذ المحتوي على كربيدات ونيتريدات عناصر الكروم والتيتانيوم والموليبيديوم والتجستن .

وفيما يلي مثال لتوضيح طريقة حساب معدل الزحف .

مثال (3-6)

وجد أنه يمكن التعبير عن الزحف لكثير من الفلزات والسبائك عند حالة الاستقرار بالمعادلة التالية المدرجة أدناه :

$$\epsilon_s = C \sigma^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \dots \dots \dots (22-3)$$

حيث أن :

ϵ_s : معدل الزحف .

C : ثابت .

σ : الإجهاد .

n : أس الإجهاد ويساوي تقريبا أربعة .

Q : طاقة تنشيط الزحف .

R : ثابت الغاز .

T : درجة حرارة الغاز المطلقة بالكلفن (K°) .

وعند إجراء التجربة لقياس معدل الزحف على أحد الفلزات وجد أن معدل الزحف يساوي (1%) للساعة عند درجة حرارة ($800^\circ c$) ، بينما يكون المعدل مساويا (0.005%) للساعة ، عندما تكون درجة الحرارة ($700^\circ c$) وذلك عند الإجهاد نفسه والمطلوب إيجاد ما يلي :

(a) حساب طاقة التنشيط للزحف في مدى درجات حرارة من ($700 - 800^\circ c$) .

(b) إيجاد معدل الزحف عند درجة حرارة ($500^\circ c$) للإجهاد نفسه مع توضيح أي فرضية مقترحة لتكون الإجابة صحيحة .

(c) إيجاد النسبة المئوية للزيادة اللازمة في الإجهاد للحصول على زيادة في معدل الزحف نتيجة زيادة درجة الحرارة 20°C من درجة حرارة 800°C إلى 820°C .

الحل :

(a) حيث إن معدل الزحف يعبر عنه بالمعادلة (22-3) ، والتي يمكن كتابتها أيضا على الصورة التالية :

$$\ln \epsilon_s = \ln C \sigma^n - \frac{Q}{RT} \dots\dots\dots(23 - 3)$$

وبما أن الإجهاد المؤثر ثابتا ، فإن $\ln C \sigma^n = \text{مقدار ثابت}$. وبتطبيق العلاقة (23-3) ، عند درجتى الحرارة 700°C ، 800°C نحصل على المعادلتين التاليتين :

$$\ln 0.01 = \ln C \sigma^n - \frac{Q}{(1073)R} \dots\dots\dots(24 - 3)$$

$$\ln 5.5 \times 10^{-4} = \ln C \sigma^n - \frac{Q}{(973)R} \dots\dots\dots(25 - 3)$$

وبطرح المعادلة (25 - 3) من المعادلة (24 - 3) نحصل على :

$$\ln \frac{0.01}{5.5 \times 10^{-4}} = \left(\frac{Q}{R} \right) \left[\frac{1}{973} - \frac{1}{1073} \right]$$

وبفرض أن Q لا تعتمد على درجة الحرارة فإن :

$$Q = 259.93 \text{ KJ / mol.}$$

(b) لإيجاد معدل الزحف عند درجة الحرارة 500°C ، فلا بد من إيجاد مقدار الثابت $C \sigma^n$ ، ويمكن الحصول عليه من العلاقة التالية :

$$0.01 = C \sigma^n \exp\left[\frac{-259.93}{(8.1 \times 10^7)}\right]$$

$$\therefore C \sigma^n = 4.573 \times 10^{10}$$

$$\therefore \dot{\epsilon}_{500+273} = 4.573 \times 10^{10} \exp\left[\frac{-259.93}{(8.1 \times 10^7)}\right] = 1.22 \times 10^{-7} \text{ h}^{-1}$$

أي أن معدل الزحف يكون مساويا للمقدار $1.22 \times 10^{-5} \%$. ولكي يتحقق ذلك فلا بد أن تكون آلية الزحف المؤثرة واحدة في جميع الحالات و كذلك طاقة تنشيط الزحف .

(c) لإيجاد مقدار الزيادة في الإجهاد اللازم للحصول على زيادة في معدل الزحف نتيجة رفع درجة الحرارة من $800-820^{\circ}\text{C}$ تطبق العلاقة (22-3) عند درجتى الحرارة المذكورتين ، لنحصل على المعادلتين (26-3) و (27-3) كما يلي :

$$\sigma_{s(1093)} = C \sigma_1^4 (3.73 \times 10^{-13}) \dots\dots\dots (26-3)$$

$$\sigma_{s(1073)} = C \sigma_2^4 \exp\left(\frac{-259.93 \times 10^3}{8.1 \times 10^7}\right) = C \sigma_2^4 (2.186 \times 10^{-13}) \dots\dots\dots (27-3)$$

وبحل المعادلتين (26-3) و (27-3) نحصل على العلاقة التالية :

$$C \sigma_1^4 (3.73 \times 10^{-13}) = C \sigma_2^4 (2.681 \times 10^{-13})$$

$$\therefore \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right)^4 = \frac{3.71}{2.681} \Rightarrow \therefore \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right) = 1.068 \Rightarrow \therefore \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_1} = 0.068$$

وعلى هذا الأساس فإن النسبة المئوية للزيادة في الإجهاد تساوي % 6.8 .

8.3 التصدّد الانفعالي (Strain Hardening)

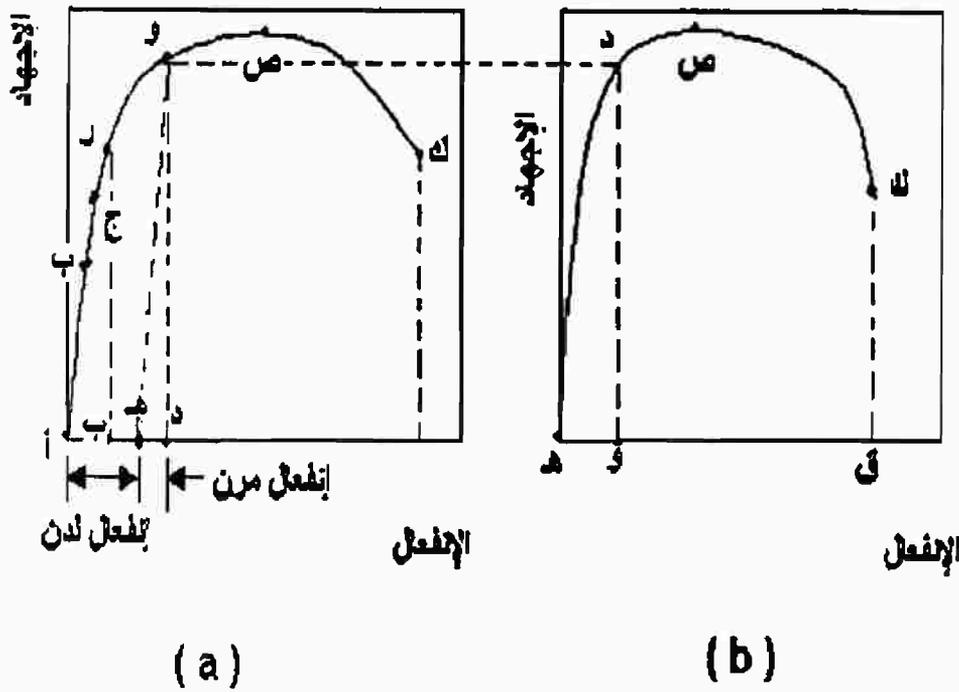
يمثل الشكل (3-36) منحنى الإجهاد - والانفعال لأحدى المواد . فإذا حملت عينة من هذه المادة في النقطة (ج) فإن العينة تسلك المسار (أ ب ج) وإذا أزيلت الحمولة بعد ذلك ، فإن العينة ستعود لشكلها الأصلي متخذة نفس المسار السابق وهو المسار (ج ب أ) وذلك لأن التحميل كان أقل من حد المرونة للمادة .

وإذا أعيد تحميل هذه العينة بعد ذلك إلى النقطة (د) ، أي بعد حد المرونة ، فإنها تسلك المسار (أ ب ج ر د) على منحنى الإجهاد - والانفعال المبين في الشكل (3-3.a) ، وإذا أزيلت هذه الحمولة ورفعت هذه العينة من آلة إختبار الشد وأعطيت لأحد الفنيين بالمعمل لإجراء إختبار شد عليها مرة أخرى لنتج المنحنى المبين في الشكل (3-3.b) ، ولحصل حد مرونة في النقطة (د) أعلى من الموجود في النقطة (ر) . إن سبب ذلك هو عند إزالة الحمولة من نقطة (د) ، تسلك المادة المسار (د هـ) الموازي للخط (ر أ) بدلاً من المسار (د ر ب ج أ) ، وعند قيام الفني بإختبار العينة مرة أخرى وتحميلها ، أتبع المسار (هـ د ص ك) ، وسبب هذا هو حدوث انفعال مرن من نقطة (أ) حتى النقطة (ر) ، ونتج انفعال لدن من نقطة (ر) حتى نقطة (د) ، أي حدثت تغييرات لدنة في بنية المادة الداخلية ، حيث تتولد وتتحرك إنخلاعات داخل المادة ، وحيث أن التشكيل هو لدن أي دائم ، فعند إزالة الإجهاد بقي الانفعال

اللدن (أ هـ) ولم يختلف إلا الانفعال المرن (وهـ) فقط ، والنواتج من إتباع المادة للمسار (دهـ) .

وعند إعادة إجهاد المادة مرة أخرى والذي قام به الفني في الاختبار الثاني للعينة ، لم يحدث أي تغير لدن جديد ودائم في بنية المادة وبالتالي فإن الانفعال الحادث من نقطة (هـ) حتى نقطة (د) ما هو إلا انفعال مرن قدره (وهـ) وهو أكبر من الانفعال المرن في الشكل (a) وبالغلة قيمته (أس) والنواتج من إجهاد المادة لأول مرة . وبمقارنة الشكلين في (a) و (b) نجد أن حد المرونة في الاختبار الثاني (نقطة د) أعلى منه في الاختبار الأول (نقطة ر) أي أن الانفعال الناتج من التحميل بأكثر من حد المرونة يؤدي إلى زيادة في مقاومة الخضوع ، أي يؤدي إلى تصلد المادة . لذلك يطلق على هذه الظاهرة بظاهرة " التصلد الانفعالي " أو التصلد بالتشكيل (Work Hardening) ، أو التشكل على البارد (Cold Work) ، وتعرف بأنها الزيادة في الإجهاد المطلوبة لإحداث زيادة في الانفعال في مجال لدونة المادة .

إن ظاهرة التصلد الانفعالي من الخواص المهمة للمادة ، فعند تشكيل المواد مثلا نجد أنه كلما زادت كمية التشكيل اللدن ، زادت كمية التصلد الانفعالي وقلت مطيلة المادة ، وبالتالي تقل كمية التشكيل اللدن المسموح بإجرائها على المادة للوصول إلى الشكل المطلوب . ويتسبب التصلد الانفعالي أيضا في خفض معايير متانة المادة المشكلة مما يجعلها سهلة الكسر عند تعرضها للصدمات والطرق ، إلا أنه قد يستفاد من تلك الظاهرة في الأجزاء الإنشائية حيث تستغل في رفع مقاومة الخضوع .



الشكل (36-3)

كيفية حصول التصلد الانفعالي في المادة

(a) عينة تختبر لأول مرة . (b) عينة سبق اختبارها حتى النقطة (د) .

9.3 شكل الكسر

يتخذ الكسر أشكالاً مختلفة تبعاً لنوع المادة المختبرة . يبدأ الكسر في المواد المطيلة كالصلب منخفض الكربون عند منتصف العينة ، ويمتد الكسر جانبياً في اتجاه عمودي على محور العينة مكوناً سطحاً مستويًا خشناً يتغير بعده اتجاه الكسر النهائي ليميل بزاوية 45° تقريباً على محور العينة محدثاً الكسر النهائي للعينة ويطلق على شكل الكسر هذا بكسر القدر والمخروط (Cup and Cone) .

10.3 فحص المواد (Inspection Of Materials)

يتم فحص المواد في المراحل الأولى من الإنتاج والتصنيع ، وفي مراحل التشكيل والتشغيل وفي فترات الصيانة . ويهدف الفحص في أي مرحلة إلى التأكد من سلامة المادة وخلوها من العيوب ومطابقتها للمواصفات ، والتعرف عليها وعلى تركيبها وما قد يطرأ عليها من عيوب . وقد وجد أن العيوب يمكن أن تتكون في المادة أو تتولد فيها أثناء التصنيع ، أو أثناء الاستخدام والاستعمال ، ففي أثناء عمليات التصنيع للأجزاء أو كامل المنشأة أو المعدة يوجد العديد من الاحتمالات لحدوث العيوب من خلال الظروف الميكانيكية التالية :

- 1- عيوب ناتجة عن انكماش الجزء أو تقلصه في حالة الصب أو اللحام .
- 2- عيوب ناجمة عن عدم انتظام التشكيل أو الزيادة فيه خاصة في حالة المنتجات المشكلة بالطرق .
- 3- عيوب ناتجة عن الأجهادات الحرارية في دورة التصنيع .
- 4- عيوب ناتجة عن إجهادات التغير في التركيب البلوري للمادة .

أما بعد إنتاج الجزء أو المعدة وفي أثناء عمل هذا الجهاز يمكن أن تظهر العيوب في فترة التشغيل والاستعمال وأكثر العيوب المحتملة في هذه الحالة هي :

- (a) الكلال والتآكل الكلاسي .
- (b) إجهادات وحدث الكسر .
- (c) خدوش الزحف .

ويعد التعرف إلى العيوب قبل فشل المادة وعجزها تماما ومن ثم انهيارها نوعا من الوقاية لمعالجة المشكلة في بدايتها قبل وقوع الانهيار أو حدوثه في المادة . بهذا نقل من المخاطر . وأهم مراحل فحص المواد هي :

1) أثناء عملية التشغيل بالماكينات والتشكيل ، ويهدف هذا الفحص في هذه المراحل إلى ملاحظة الأبعاد والتأكد من أن المادة قد اكتسبت الخواص المطلوبة أثناء عمليات المعالجة المختلفة ، إضافة إلى التأكد من أن عمليات التشغيل لم تسبب أي خدوش أو تصدع للمادة المشكّلة .

2) عند استلام المادة لاستخدامها في الغرض المطلوب ، ويهدف الفحص في هذه الحالات إلى التأكد من مطابقتة المادة للمواصفات المطلوبة من حيث نوعها وتكوينها وتركيبها وكذلك دقة أبعادها ، كما يهدف الفحص في هذه الأثناء إلى التأكد من خلو المادة من أية عيوب أو تصدعات سواء كانت على السطح الخارجي أم داخل المادة .

3) الكشف الدوري والصيانة ، ويهدف ذلك النوع من الفحص إلى التعرف على المادة ومدى صلاحيتها للاستمرار في الغرض المستعملة لأجله ، إضافة إلى الكشف عن بداية تكوين أية عيوب أو مشاكل قد تكون سببا لانتهيار المادة ، وبهذا يمكن تلافي وقوع كارثة كبيرة ومن أمثلة ذلك الكشف الدوري على الطائرات سواء المحركات أو جسم الطائرة نفسها ، وكذلك معدات محطات تحلية المياه أو مصافي البترول وغيرها .

4) بعد انهيار المادة أو إخفاقها يتم عندئذ فحص أجزاء صغيرة من المادة المكسورة ويركز بوجه خاص على التي حدث فيها الانهيار . ويمكن من هذا الفحص الحصول على معلومات مهمة عن أسباب هذا الانهيار ، سواء كانت متعلقة ببنية المادة نفسها أو نتيجة عيوب في عمليات التشكيل أو المعالجة الحرارية التي تمت لهذه المادة ، أو لظروف الاستعمال التي كانت تعمل فيها المادة .

لكي يتم إجراء فحص المادة سواء قبل حدوث الانهيار أم بعده ، فلا بد من تحضير عينات منها . وتقسّم إختبارات الفحص إلى نوعين رئيسيين ، إختبارات متلفة حيث يحتاج الإختبار في هذه الحالة إلى قطع أجزاء (عينات) من المادة لإجراء الفحص عليها ، أو إجراء بعض الإختبارات على المادة

بأكملها حتى يتم انهيارها كما سبق توضيحه ، واختبارات غير متلفة حيث يتم فحص أجزاء المادة دون الحاجة إلى قطع عينات منها ، أو إجراء تعديلات أو تغييرات في أبعادها أو خواصها .

وتهدف أولى مراحل الفحص إلى التأكد من الأبعاد الخارجية للمادة ويمكن التأكد من صحة تلك الأبعاد أثناء عمليات التشكيل بالصب أو بالحدادة بقياس أبعاد بعض أجزاء المادة باستخدام فرجار قياس مناسب أو باستخدام مقياس مقارنة ، ويهدف ذلك الفحص إلى التأكد من أن السطح نظيف ولا توجد فيه زيادات أثناء التشكيل ويمكن في الوقت الراهن استخدام التقنيات الحديثة مثل تقنية الأشعة السينية والاستعاضة بها عن الطرق التقليدية وعندئذ لا يلزم قطع أو تشويه المادة . أما الاختبارات الأخرى والأساسية في هذا المجال فمنها فحص السطوح والتركيب والتكوين الداخلي وشكل السطح الخارجي للمادة والتعرف إلى المادة أو أية عيوب فيها ، ومن أهم تلك الفحوصات :

1.10.3 الفحص الضوئي (Photo Examination)

يمكن عن طريق الميكروسكوب الضوئي تحديد حجم الحبيبة وشكلها وكذلك اتجاهات الحبيبات وكيفية توزيعها ، كما يمكن الكشف عن طور المادة الفلزية أو الأطوار المختلفة المكونة لسبيكة معينة ، وإضافة إلى ذلك يمكن التعرف على نوع المعالجة الحرارية التي مرت بها المادة ، ويمكن كذلك التعرف على نوع إنهار المادة . وبهذا يمكن التوصل إلى أسباب هذا الانهيار سواء كان ناتجا من وجود عيوب في المادة نفسها أم في ظروف العمل أو الجو المحيط بها . ويوجد نوعان من الفحص المجهرى للمادة هما :

(a) الفحص الماكروسكوبي (Macroscopic Examination) ، حيث يتم الفحص في هذه الحالة بقوة تكبير صغيرة تتراوح عادة من 5 إلى 10 .

(b) الفحص الميكروسكوبي (Microscopic Examination) يتم في هذه الحالة فحص المادة عند قوة تكبير أكبر بكثير من الفحص الماكروسكوبي . وتتراوح في هذه الحالة قوة التكبير من 20 إلى 2000 .

1-1.10.1 الفحص الماكروسكوبي

وهذا لا يتطلب توفر أجهزة دقيقة ويمتاز بإمكانية فحص مساحات كبيرة من العينة في الوقت نفسه بحيث تغطي منطقة التلف أو الفشل وبعض المناطق المحيطة بهما ، وتستخدم طريقة الفحص الماكروسكوبي أساسا للتعرف على أسباب الانهيار الذي يحدث للمادة أو فحص سطوح التشغيل للتأكد من عدم حدوث أي تصدعات أو خدوش . ويظهر الفحص الماكروسكوبي الدلائل التالية :

- 1- توضيح عدم تجانس تركيب المادة نتيجة حدوث عزل لبعض عناصر السبيكة كما في حالة فلز الأنثيمون في سبيكة لقمة الإرتكاز أو الرصاص في سبائك البرونز وكذلك الفوسفور في سبائك الفولاذ .
- 2- تحديد مدى احتواء المادة على مواد ضمنية (inclusions) غير معدنية مثل الخبث من الكبريتيدات أو الأكاسيد .
- 3- التعرف إلى حجم البلورات (الحبيبات) وآلية النمو أثناء تجمد المادة الفلزية .
- 4- بيان اتجاه نمو الحبيبات وذلك في حالة الحدادة حيث ترتبط مقاومة المادة إلى حد كبير باتجاه نمو الحبيبات كما يحصل لمادة الخارصين (الزنك) .
- 5- طريقة التصنيع ، صب أو حدادة أو لحام ، سواء لحام بالنحاس أو أية مادة مألوفة أخرى .

- 6- إظهار عيوب البنية الداخلية المصاحبة لعمليات التصنيع ، مثل فجوة أنبوبية أو فجوة غازية أو ثنية أو تحضين .
- 7- التعرف إلى حدوث عدم الانتظام في عمليات المعالجة الحرارية .
- 8- تحديد مدى حدوث الانفعالات الميكانيكية .

(a) تجهيز سطح العينة للفحص الماكروسكوبي

يجب تجهيز سطوح المواد الفلزية (الفلزات والسبائك) للفحص الماكروسكوبي وذلك بتعريضها إلى مظهر مناسب (freckle) ونتيجة لذلك فإن التركيب البلوري أو المركبات أو المكونات المختلفة أو الجزء المتعرض لإجهاد أو انفعالات وبدرجات مختلفة حيث يتآكل ويظهر نمط معين على السطح . وتجرى عملية النمش بتبليد المادة باستخدام ممسحة مغمورة في محلول النمش أو بغمر كامل العينة في الإناء المحتوي على محلول النمش والاستمرار حتى وضوح معالم السطح ثم رفع العينة وغمرها في الماء ثم في محلول كحولي وبعد ذلك تجفيفها . يتراوح وقت النمش ما بين عدة ثواني إلى بضعة دقائق ويعتمد نجاح عملية النمش على الخبرة ويمكن مع المحاولات العديدة الحصول على نتائج مرضية .

(b) كيميائيات النمش (Etching Chemicals)

تستخدم التراكيب الكيميائية التالية في عمليات النمش للفحص الماكروسكوبي للسطوح وذلك اعتماداً على الغرض من الفحص .

- 1- إظهار العزل لعناصر السبيكة والتركيب البلوري في الفولاذ .

10g	يود
20g	يوديد البوتاسيوم
100cm ³	ماء

يذاب يوديد البوتاسيوم في كمية قليلة من الماء ثم يضاف اليود وعند إتمام الإذابة يضاف الماء المتبقي وتغمر العينة في المحلول .

2- إظهار الاختلافات في التركيب البلوري في الفولاذ :

10 ملليجرام	أمونيوم باراسلفات
90 سنتيمتر مكعب	ماء
يحضر هذا المحلول عند الحاجة إليه ويجب عدم استعمال محاليل سبق تحضيرها ويمكن أن يستخدم المحلول التالي للغرض نفسه :-	
10 سنتيمتر مكعب	حمض النتريك المركز
90 سنتيمتر مكعب	ماء

3- النمش العميق للفولاذ : يستخدم فيه المحلول التالي :

140 سنتيمتر مكعب	حمض الهيدروكلوريك
3 سنتيمتر مكعب	حمض الكبريتيك
50 سنتيمتر مكعب	ماء

يتم غمر العينة في هذا المحلول عند درجة حرارة 90°C لحوالي ربع أو نصف ساعة .

4 - توضيح خطوط التشكيل في الفولاذ وفي هذا الاختبار يتم بيان المنطقة التي تعرضت للانفعال بعد منطقة المرونة ومحلل النمش المذكور هنا محدد للفولاذ الطري (soft steel) الذي يحتوي على نسبة معينة من النتروجين ويمكن استخدام المحلول التالي :

كلوريد النحاس	90 ملليجرام
حمض الهيدروكلوريك	120 سنتيمتر مكعب
ماء	100 سنتيمتر مكعب

قبل النمش يكون من الضروري تسخين العينة إلى درجة حرارة $250-200^{\circ}c$.

5- إظهار التركيب في الفولاذ المتفرع (Dendritic Steel) باستخدام محلل النمش التالي ولزمن يتراوح ما بين نصف ساعة إلى أربع ساعات مع تقليب المحلول أثناء عملية النمش مع حك النحاس المترسب على السطح بقطعة من الصوف القطني .

كلوريد النحاس	9 ملليجرام
ماء	91 سنتيمتر مكعب

إن إضافة حمض الهيدروكلوريك للمحلول تساعد على زيادة مفعول النمش ولكن يجب إجراء هذه العملية في محلول متعادل لمنع التصاق النحاس في الفولاذ ويمكن مسح العينة مسحا خفيفا باستخدام ورق الصنفرة.

6- للفولاذ المقاوم للصدأ (Stainless Steel) والفولاذ الأوستيني (Austenitic Steel) .

يستعمل للنمش المحلول التالي :

15 سننيمتر مكعب	حمض الهيدروكلوريك
5 سننيمتر مكعب	حمض النتريك
100 سننيمتر مكعب	ماء

7- الألمنيوم وسبائكه وتتكون أهم محاليل نمش الألمنيوم وسبائكه من المواد التالية :

10 سننيمتر مكعب	حمض الهيدروفلوريك
1 سننيمتر مكعب	حمض النتريك
200 سننيمتر مكعب	ماء

ويمكن إزالة الطبقة السوداء المتكونة على السطح بالنمش السريع في حمض النتريك المخفف.

8- النحاس والنحاس الأصفر والبرونز يتكون محلول نمشها من :

45 سننيمتر مكعب	حمض النتريك
50 سننيمتر مكعب	ماء
0.2 سننيمتر مكعب	كرومات البوتاسيوم الثنائية

9 - الخارصين أو الزنك: يستعمل للنمش محلول حمض الهيدروكلوريك في الماء وبتركيز 50% .

10- المغنيسيوم : يمكن نمش المغنيسيوم بالمحلول الحاوي على تركيز 10% من حمض النتريك في الماء .

(c) فحص التصدعات

من العوامل المهمة التي يجب أن تؤخذ بنظر الاعتبار عند إجراء الفحص الماكروسكوبي هي العوامل التالية :

- 1- دراسة ظروف استخدام المادة من حيث درجة الحرارة والضغط وكذلك العوامل المحيطة بالمادة المستعملة من حيث التراكيب الكيميائية .
- 2- تأريخ حياة القطعة " كيفية ومصدر التشكيل ومطابقته للمواصفات الأولية " .
- 3- الأجهادات التي تعرضت لها قبل الفحص .
- 4- مقارنة ما تقدم مع الظروف المثالية والمقترحة لاستخدام المادة .

ومن أهم العوامل التي تستدعي إجراء الفحص الماكروسكوبي هي العوامل التالية :

- (a) التركيب ، وهو أول أسباب فشل المادة وتصدها ، سواء كان الكيميائي أو توزيع الأوجه داخل المادة وبالتالي الخواص الناتجة عنها كالصلادة ومقاومة التآكل والصدمات والأكسدة وثبات الأبعاد ، ويمكن أن يكون التركيب الكيميائي الخاطيء نتيجة اختيار خاطيء للمادة المناسبة أو كون مخلوط السبيكة غير صحيح كما في حالة تصنيع الفولاذ حيث تؤثر كل العوامل أعلاه على البنية الداخلية للسبيكة .
- 2- إساءة الاستخدام أثناء العمل ، أي زيادة التحميل الانفلات أو اختلاف المحاذاة في الأعمدة .
- 3- التشكيل أو التصنيع ، يمكن أن ينتج عن عمليات التشكيل بعض العيوب التي تساعد على إنبهار المادة وفشلها ، مثل نتوءات واضحة أو إجهادات موضعية أثناء خرم الثقوب .
- 4 - الكلال ، وهو من أكثر الانهيارات شيوعا في المواد الفلزية .
- 5- الكسر البلوري الخشن، ينتج أما عن التسخين الزائد أثناء المعالجة الحرارية أو درجة الحرارة العالية عند الصب أو الدلفنة على البارد .

6- الانهيار البلوري السيني ، هذا يعود لوجود الشوائب الهشة على جدران الحبيبات كما في حالة كبريتيد الحديد (FeS) في الفولاذ أو وجود البزموت (Bi) في النحاس أو سبائك الفولاذ أو الألمنيوم أو الشوائب في سبائك الخارصين .

7- التركيب المعيب ، هو الذي يحتوي على عيوب مثل الفجوات الأنبوبية والانعزال ، والتركيز الموضعي للشوائب وترسب جزيئات الخبث في ألواح الفولاذ والكربنة الناتجة من لهب الزيت وتؤدي تلك العيوب في النهاية إلى فشل المادة .

8- التشققات ، يمكن أن تبدأ هذه في الفلزات من جزيئات الخبث أو التبريد المفاجئ ، أو نتيجة الاختلافات الموضعية في معاملات التمدد الحراري نظرا لعدم انتظام التسخين في الأجسام الكبيرة .

9- خشونة السطح ، تنتج من مطاطية الانفعالات أو الحبيبات الكبيرة .

10- التآكل ، يمكن أن يكون الانهيار ناتجا عن التآكل الناجم عن التيارات التي تحدث بالقرب من الأجهزة الكهربائية ، أو نزع الخارصين من النحاس الأصفر أو ارتطام الفقاعات الهوائية بالسطوح وتكوّن النقر .

3- 2-1-9 الفحص الميكروسكوبي (Microscopic Examination)

يختلف عن سابقه في أنه يحتاج إلى مساحة صغيرة من سطح المادة ، ويتم الفحص بقوة تكبير أعلى وبهذا يمكن الحصول على معلومات أوفى وأوضح عن التركيب الداخلي للفلزات والتي لا يمكن الوصول إليها عن طريق الفحص الأول . إن أهم الخطوات اللازمة لإعداد العينات للفحص هي :

(1) اختيار العينة اللازمة للفحص وقطعها (Selection and Cutting) .

(2) تثبيت العينة (Mounting) .

(3) ترقيم العينة وتحديدها (Marking) .

(4) الشحذ والتجليخ (Grinding) والصفل (Polishing) .

(5) التنظيف (Cleaning) .

(6) النمش (Etching) .

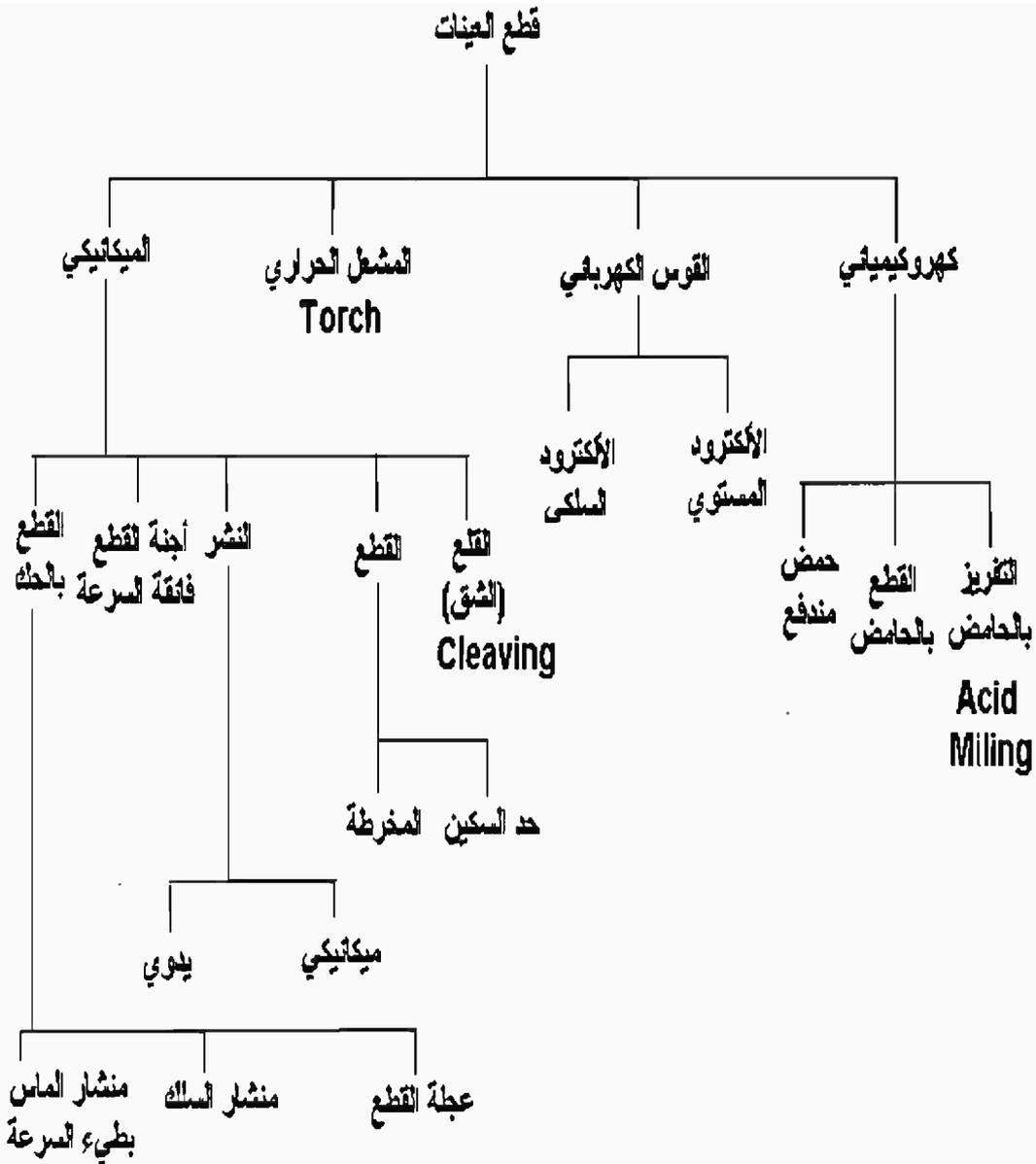
ويمكن إجراء هذه الخطوات بطرق مختلفة اعتماداً على نوع المادة وشكل الكسر أو الانهيار. إن الخطأ في أي خطوة يؤثر على النتائج النهائية وللوصول إلى أفضل النتائج يجب مراعاة ما يلي :

- 1- أن تكون العينة المختارة هي أفضل ما يمثل المادة المفحوصة .
- 2- أن توضح العينة المختبرة البنية الداخلية للمادة بشكل تام ولذا يجب تجنب تغيير البنية الداخلية عند قطع العينة والتي يمكن أن تحدث نتيجة لما يلي :
 - (a) معالجة أو معاملة أو تشكيل السطح .
 - (b) الخدوش أو انتزاع أي جزء من المادة أثناء القطع أو الشد أو الصقل .
 - (c) التلوث من الأحماض أو مواد النمش والإظهار .

عند اختيار العينة أو القطع من المواد المطلوب فحصها يجب مراعاة

ما يلي :

- 1- أن تكون ممثلة للمادة المطلوب فحصها .
- 2- إن لا تغير عملية القطع والإعداد من طبيعة المادة أو تركيبها .
- 3- أن تكون العينة كبيرة بدرجة كافية .
- 4 - يفضل استخدام طرق القطع التي تسمح بعمليات الشد والصقل مباشرة بعد القطع .
- 5- تعتمد طريقة أخذ العينات على نوع الاختبار وهو أما أن يكون اختبار روتيني عام ، أو حالة فحص خاصة تستخدم طرق تناسب المادة المقطوعة .
ويوضح الشكل(3-37) الطرق المختلفة لقطع العينات ، وأهم طرق القطع المستخدمة على نطاق واسع هي القطع بالحك وهي الطريقة المفضلة عالمياً .



الشكل (3-37) الطرق المختلفة لقطع العينات اللازمة للفحص الميكروسكوبي

11.3 تمارين

- س1- ما هو الإجهاد الحقيقي والانفعال الحقيقي .
- س2- أشرح كيفية قياس صلادة المعدن باستخدام اختبار كل من :
- a - برينل b - فيكرز c - روكويل
- س3- ما الذي يحد من استخدام اختبار برينل في قياس الصلادة المرتفعة .
- س4- ما هو الفرق بين اختباري شاربي وأيزود .
- س5- أذكر من بين خواص المادة - المطيلية ، الصلادة ، الزحف ، الصدمات والكلال الميزات المهمة الواجب ذكرها في مواصفات المواد المستخدمة لتصنيع الأجزاء التالية :
- a- ريشة مروحة b - أنبوبة غاز عادم السيارة c - جناح الطائرة
- d- قالب الحدادة e - أنابيب بخار الماء في محطات الطاقة .
- س6- ما هي العوامل المؤثرة على اختبار الصدمات .
- س7- أشرح أهم العوامل التي تستدعي إجراء الفحص الميكروسكوبي .
- س8- تعرض قضيب من الصلب قطره 10 mm ، لحمل قدره 600kg دون أن تحدث له استطالة لدنة . أحسب أولاً الإجهاد المؤثر على هذا القضيب ، إذا كان معامل المرونة لهذا القضيب هو 205000 MPa ، ما هو الانفعال الناتج عن هذا الحمل .
- س9- أنكسر القضيب المذكور في السؤال السابق عند حمل مقداره 11,000 kg وكان القطر النهائي 6.5 mm أوجد ما يلي :
- 1- ما هو إجهاد الكسر الهندسي .
- 2- ما هو إجهاد الكسر الحقيقي .
- س10- تم الحصول على النتائج التالية من اختبار شد أجري على عينة من سبيكة طولها الأصلي 50 mm ، وقطرها الأصلي 12 mm وأقل قطر بعد الكسر 10 mm .

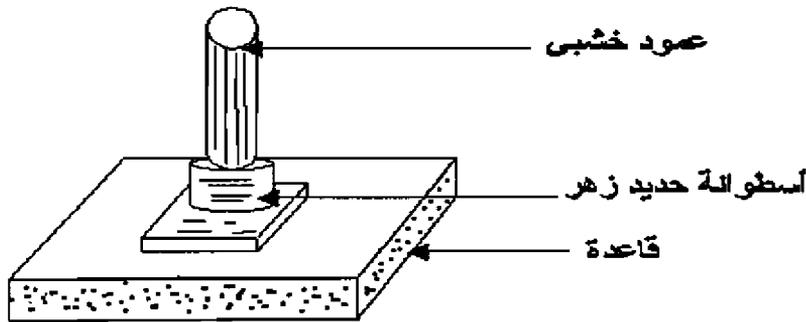
الحمل (KN)	20	40	50	60	65	70	80	80	76
الاستطالة (mm)	0.1	0.2	0.25	0.3	0.36	0.51	1.26	2.48	2.35
حدوث الكسر									

ارسم منحنى الإجهاد - والانفعال ثم أحسب :

- (a) 0.2% إجهاد الصمود . (b) مقاومة الشد . (c) معامل المرونة .
 (d) حد التناسب . (e) المطيلية . (f) معايير المرونة . (g) معايير الرجوعية .

س11- سلك من الصلب مثبت بين برجين على ضفتي نهر بهدف تدريب الجنود على عبور النهر . فإذا إجهاد الشد الناتج عن تثبيت السلك بين البرجين عند درجة حرارة $25^{\circ}C$ هو 20Mpa . ما هي قيمة الإجهاد في السلك إذا انخفضت درجة الحرارة فجأة إلى $19^{\circ}C$ ، علما أن معامل التمدد الطولي لهذا السلك يساوي $11,7^{\circ}C^{-1} \times 10^{-6}$ ، ومعامل المرونة هو $205,000\text{Mpa}$.

س12- عمود إنارة من الخشب قطره 20cm مثبت كما موضح في الشكل أدناه في أسطوانة من حديد الزهر قاعدتها مربعة أبعادها $30 \times 30\text{cm}^2$ والأسطوانة موضوعة على قاعدة خرسانية مربعة أبعادها $100 \times 100\text{cm}^2$. أحسب أقصى حمل ضغط يمكن تسليطه محوريا على العمود الخشبي ، وكذلك مقاومة ضغط التربة حتى تتحمل هذا الحمل علما بأن مقاومة الضغط لكل من الخشب والخرسانة هي 100kg/cm ، 45 على التوالي .



الشكل (38-3) : طريقة تثبيت عمود الإنارة

س13- سبيكة من البرونز معامل يونج لها يساوي 110,000 Mpa ، ومقاومة خضوعها 158 Mpa ، وإجهاد الكسر لها هو 238 MPa ، والنسبة المئوية للنقص في مساحة مقطعها العرضي بعد الكسر هي 34% .
أحسب ما يلي :

- 1- الانفعال الحقيقي قبل بداية الخضوع مباشرة .
- 2- الإجهاد الحقيقي عند نقطة الكسر .

س14- أجري اختبار برينل بكرة قطرها 10 mm ، على سطح من الصلب منخفض الكربون بحمل قدره 2000 Kg ، فتركت أثر قطره 5 mm. أحسب مقاومة شد هذا الصلب .

س15- تم الحصول على النتائج التالية من اختبارات زحف عند درجة حرارة 800°C لصلب غير قابل للصدأ . فإذا علمت أن العلاقة بين انفعال الزحف و الإجهاد تتبع المعادلة $\epsilon_c = m \sigma^n$ ، حيث أن ϵ_c هو انفعال الزحف ، σ هو الإجهاد و m ، n هي ثوابت خاصة بالعلاقة. أحسب قيم n ، m من النتائج المبينة في الجدول أدناه :

352	281	211	141	106	70	الإجهاد (N/mm ²)
320	30	2	0.025	0.0026	0.00008	أقل معدل للزحف (h %)

س16- تم الحصول على النتائج التالية من اختبار شد، فإذا كان قطر العينة الأعلى هو 12 mm والقطر بعد الكسر 7 mm وطولها الأعلى هو 50 cm :

160	195	130	75	69	70	65	60	50	25	الحمل (KN)
حدوث الكسر										
70 بعد الكسر	61	51.5	50.28	50.2	50.15	50.13	50.12	50.1	50.05	الطول (mm)

(a) أرسم منحنى الإجهاد - والانفعال الهندسي .

(b) عين كل مما يلي :

(1) معامل المرونة (2) إجهاد الصمود 0.2 % (3) مقاومة الشد

(4) إجهاد الكسر (5) النسبة المئوية للاستطالة (6) النقص في مساحة المقطع

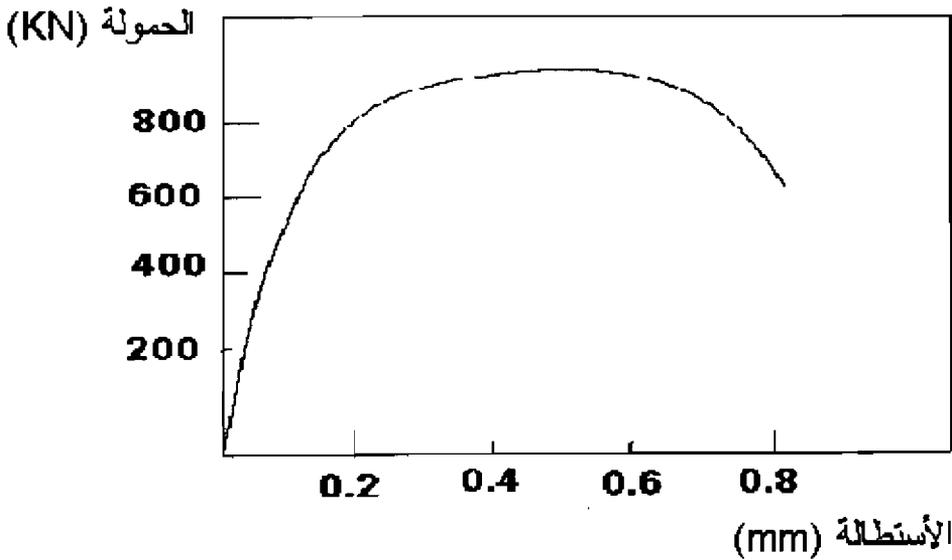
(7) معيار المتانة (8) معيار الرجوعية .

(c) أرسم منحنى الإجهاد - والانفعال الحقيقي .

س17- عينة شد مقطوعها العرضي مربع طول ضلعه 12mm وطولها الأعلى 50mm . أعطيت المنحنى الموضح في الشكل (3-39) عند شدها . أحسب مقاومة الشد ، إجهاد الصمود عند 0.2% انفعال ، معامل المرونة، والمطيلية وإذا كانت العلاقة بين كل من الإجهاد الحقيقي والانفعال الحقيقي تتبع المعادلة :

$$\sigma_{true} = m \epsilon_{true}^n$$

فأحسب قيمة الثوابت m و n .



الشكل (3-39)

منحنى عينة الشد في المسألة "17"

س18- عينة شد من سبيكة ما كسرت عند حمل 120KN . فإذا كان الطول الأصلي للعينة هو 50cm والنهائي هو 60cm والقطر الأصلي هو 10mm والنهائي 11.5mm . أحسب ما يلي :

(a) الإجهاد الحقيقي والإجهاد الهندسي عند الكسر .

(b) الانفعال الحقيقي عند الكسر .

(c) المطيلية كنسبة مئوية لكل من الاستطالة والنقص في مساحة المقطع .

س19- سبيكة نحاس معمل مرونتها 110,000 MPa ومقاومة خضوعها 330MPa ، ومقاومة شدها 250Mpa .

1- أحسب الإجهاد المطلوب لإحداث استطالة قدرها 1.5mm في قضيب من هذه السبيكة طوله 2m .

2- كم هو قطر القضيب اللازم لرفع حمل قدره 22.000N دون حدوث خضوع .

س20- أجري اختبار على أسطوانة من الألمنيوم قطرها 17cm وطولها 25cm وكانت النتائج كالتالي :

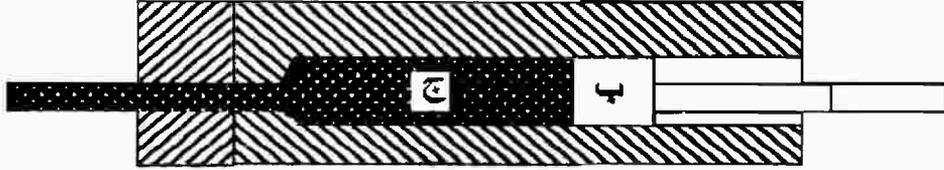
44	38.5	33	27.5	22	16.5	11	الحمل (KN)
8	6.6	5.1	2.6	1.9	0.7	0.1	التغير في الطول (mm)

1- أرسم منحنى الإجهاد - الانفعال الحقيقي .

2- أحسب مقدار الانفعال الحقيقي ومقاومة الشد لهذا المعدن .

س21- رفعت درجة حرارة قضيب من النحاس الأصفر طوله 2m بمقدار 80°C ، ما هو الإجهاد اللازم لإحداث نفس التغير في الطول علما بأن معامل مرونة هذه السبيكة هو 110,000MPa ومعامل التمدد الطولي $20^{\circ}\text{C}^{-1} \times 10^{-6}$.

س22- مكبس بئق موضح في الشكل(3-40) ، فإذا كان الحمل اللازم لبئق المادة (ج) هو 50KN ، أحسب الإجهاد الناتج في كل من الجزئين (أ و ب) ، إذا كان قطريهما 20mm ، 50mm على التوالي .



الشكل (3 - 40) يوضح مكبس بئق المستخدم في المسألة 22

س23- أجري اختبار صلادة برينل على مادة ما فتم الحصول على النتائج التالية:

750	1470	3000	الحمل (Kg)
5	7	10	قطر الكرة (mm)
2.35	3.33	4.75	قطر الأثر (mm)

أثبت أن رقم صلادة برينل لا يتأثر تقريبا بالحمل أو قطر الكرة .

س24- عند قياس صلادة لوح من الصلب باستخدام حمل ضغط قدره 120Kg ، كان قطر الأثر المربع الناتج هو 1.2mm . أحسب مقاومة شد هذا الصلب .

س25- أستبدل أحد المصممين صلب حد إطاقته 518 MPa ، عند 10^6 دورة ، بسبيكة ألنسيوم حد أطاقته 166MPa ، لذلك أضطر لزيادة مساحة مقطع الجزء العرضي 3.125 مرة . هل توافقه على هذا القرار .