البـــاب الثالـــث

الخـــواص الميكانيكيـــة للمـــــواد

(Mechnical Properties of Materials)

1.3. مقدمـــــــة .

2.3. الخـــواص الميكانيكيـــة .

3.3. تأثيـــر درجـــة الحرارة على الخواص الميكانيكية .

4.3. التآكـــــل .

5.3. الاختبـــــارات الميكانيكيـــة .

6.3. أنـــواع الاختبـــارات وأهدافهـــا .

1.6.3 اختبـــارات وتيريـــة .

2.6.3 اختبـــارات استكشافيـــة .

3.6.3 اختبـــارات متلفـــة .

4.6.3 اختبـــارات غيـــر متلفـــة .

5.6.3 اختبـــارات الإثبـــات .

6.6.3 اختبـــارات التفتيـــش والتحـــري .

7.3. الاختبـــارات الميكانيكيـــة المعمليـــة .

1.7.3 اختبـــار الشـــــد .

2.7.3 اختبـــار الانضغـــاط .

3.7.3 اختبـــار الصـــلادة .

4.7.3 اختبـــار الصدمـــات .

5.7.3 اختبـــار الانحنـــاء .

6.7.3 اختبـــار الكـــلال .

7.7.3 اختبـــار الزحـــف .

8.3 التصلـــد الانفعالـــي .

9.3 التصلـــد الانفعالـــي .

10.3 فحـــص المـــواد .

11.3 تماريـــــن .

obeikandl.com

1.3 مقـدمـــة

في الباب الأول تم التعرض إلى أهم خواص المادة ، وقد تبين لنا اهميـــة وتأثير الخواص الميكانيكية على سلوك المادة بشكل خاص . ويمكن تعريـــف الخواص الميكانيكية للمادة بـــصورة عامة بمـــدى اســـتجابتها للحـــــمولات المعرضة لها ، من حيث التغييرات التي تطـــرأ عليهـــا والمقـــــاومة التـــي تبـــديها ، ســـواء كانـــــت الحمـــولات تـــؤثر عليهـــا أثنـــاء الاســـتعمال أو التـــصنيع ، حيث تعتبـــر الاختبارات الميكانيكية للمادة وســـيلة لقيـــاس هـــذه الصفات . وسوف نقوم في هذا الباب بعرض أهم الخواص الميكانيكية للمـــادة لما لها من اهمية ، قبل التطرق إلى الاختبارات الميكانيكية الخاصة بها .

2.3 الخواص الميكـــانيكيـــة (Mechanical Properties)

أن الخواص الميكانيكية للمواد هي الخواص التـــي لهـــا علاقـــة بتـــأثير الحمولات الخارجية على المادة ، لذلك تعتبر هذه الخواص ذات أهمية بالغـــة نظراً لتأثيرها على ســـلوك المـــادة المســـتخدمة فـــي الإنشـــاءات الهندســـية المختلفة ، وفي هذا البند سنقوم بعرض بعض أهم هذة الخواص ومنها :

a) الإجهـــاد (Stress)

يعرف الأجهاد على أنه مقـــدار القـــوة المســـلطة لوحـــــدة المســـاحة السطحية ، ويرمز له بالرمز σ ، ويعبر عنه (N/mm^2) أو (P/in^2) ويتـــــم حساب الإجهاد كما سبق ذكره في الباب الأول ، وذلك بقســـمة القـــوة علـــى مساحة مقطع السطح المؤثرة عليه تلك القوة أي أن :

$$\sigma = \frac{P}{A_o} \quad \text{..... ....} \quad (1-3)$$

obeikandl.com

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) **الانفعـــــال** (Strain)

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

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_o} \quad \text{.....(2-3)}$$

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 للطـــول الأصـــلي ، ويعبر عن الانفعال في هذة الحالة بالعلاقة التالية:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_o}\% \quad \text{.....(3-3)}$$

ويلاحظ أن قيـــم الانفعال تكون موجبة في اختبـــارات الشد ، وســـالبة فـــي اختبارات الانضغاط .

c) **الانفعـــال المـــرن** (Elastic Strain)

الانفعال المرن هو الجزء الذي يمثـل العلاقـة الخطيـة بـين الإجهـاد والانفعال في منحنى الأجهاد – والانفعال للمادة ، ويبين الشـكل (3-1) هـذه العلاقة بالنسبة للمواد المطيلة . وكما هو معروف بـان المـادة فـي منطقـة الانفعال المرن يمكنها استعادة أبعادها وشكلها الأصلي بعـد إزالـة الحمولـة الخارجية المؤثر عليها . وتوجد في هذه المنطقة علاقة بين الإجهـاد المـؤثر والانفعال الناتج ، حيث تـكون النسبة بين الإجهـاد إلـى الانفعـال مقـدارا ثابتا . ويسمى هذا المقدار الثابت بمعـامل المرونة أو معـامل يونج للمرونة (Young's Modulus of Elasticity) ويمثل ذلك بالعلاقة (3-4) :

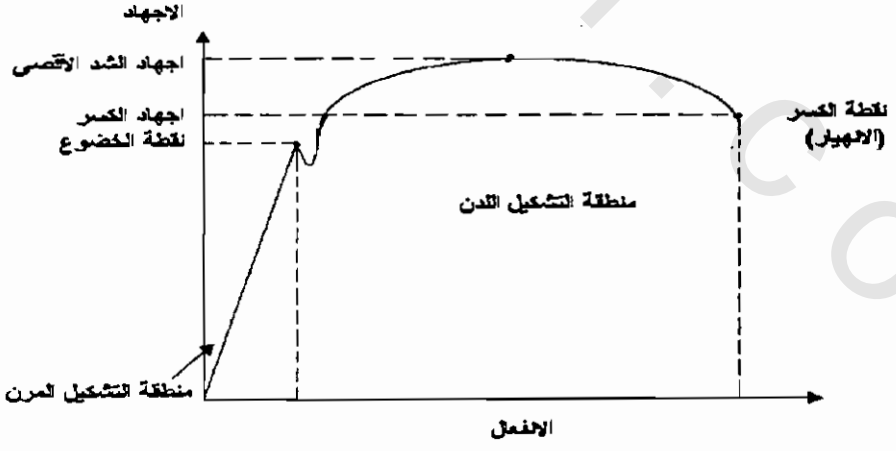
$$y = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{.....(4-3)}$$

حيث أن :

σ : هو الإجهاد ووحدة قياسه أما (MPa) أو (psi) .

ε : هو الانفعال ويقاس أما (mm/mm) أو (in/in) .

y : معامل المرونة أو ما يسمى بمعامل يونج ووحدة قياسه أما (MPa) أو (psi) .

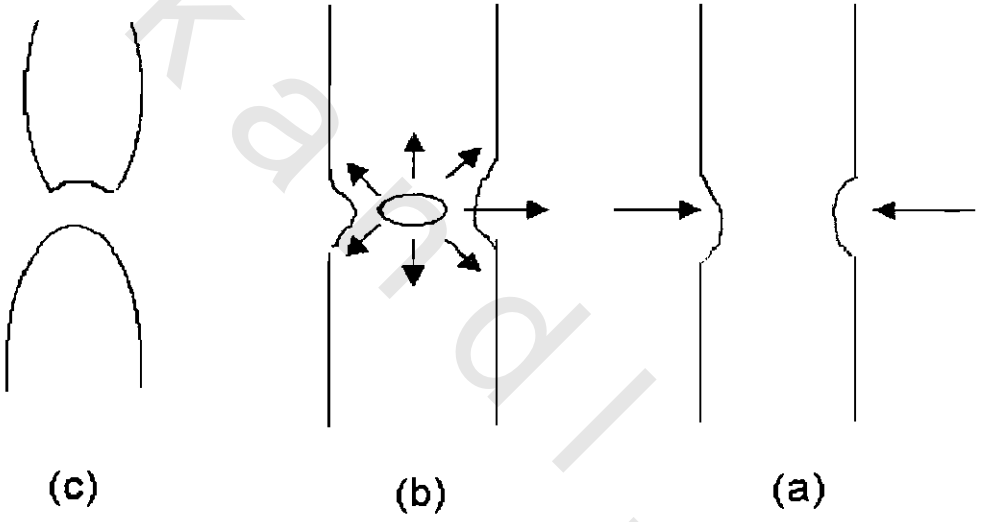


شكل (3 -1)

العلاقة بين الإجهاد والانفعال للمادة المطيلة الصلدة

d) الانفعـــال اللـــدن (Plastic Strain)

منطقة الانفعال اللدن هي المنطقـــة التـــالية للانفعال المرن فـــي منحنـــى الأجهاد – والانفعال ، ونصل إليها بزيادة مقدار الحمولة الخارجية المؤثـــرة ، أي الإجهاد النـــاتج على المادة لـــتخطي منطقة المرونـــة ، وتتغير في هـــذه المنطقة العلاقـــة بين الإجهاد والانفعال لتصبح علاقة غـــير خطية ، وتحتفظ المادة بالتغيرات الحاصلة في الشكل أو الأبعاد بعد إزالـــة الحمولة الخارجيـــة المؤثرة عليها . ويرتبط الانفعال اللدن بصغر المساحة للجزء الواقـــع تحـــت الحمـــل ، و يعرف هـــذا الجزء باسم التخصر(necking) كمـــا مبـــين فـــي الشكل (3-2) .



الشكل (3-2)

مراحل تكوين الكسر على شكل طبق وقدح

(a) بداية تكوين العنق وتكون الإجهاد المحوري .

(b) ظهور الكسر ، إزالة الإجهاد المحوري .

(c) شكل كسر الطبق والقدح .

e) **نقطــة الخضــوع** (Yield Point)

نقطة الخضوع هي النقطة التي يتم عندها التحول من الانفعال المرن إلـى الانفعال اللدن . وفي واقع الأمر، فإن هذه النقطة ليـست نقطة محددة ، ولكنها منطقة تمثـل آخر مراحل مـقاومة المادة للانفعـال اللـدن أي بمعنى أخر مقاومة التشكل (التشوه) . وهذه النقطـة أو المنطقـة مبينـة فـي الشكـل (3-1) ، وفي بعض الأحيان يطلـق على نقطة الخضوع اسـم نقطـة حـد المرونـة (elastic limit) أو إجهـاد الخضـوع ، وهـذه النقطـة تعتبـر فـي غاية الأهمية في التصميم والإنشـاءات وكـذلك فـي تشـكيل الفلـزات بشكل خاص ، حيـث أنها ترمز إلى نقطة نهاية التشكيل (التشـوه) المرن وبداية التشكيل اللدن .

f) **إجهــاد الصمــود** " الاستدلال " (Proof Stress)

في بعض المواد الفلزية الطرية مثـل الألمنيوم أو سبائكه ، لا تكون نقطة إجهاد الخضوع واضحـة ، ولا يـمكن الاستدلال عليها وتحديدها بدقة مـن منحنى الإجهاد – الانفعال كما هو مبين في الشكل(3-3) ، حيث تنتقل المـادة من منطقة التشكيل المرن إلى التشكيـل اللدن فجأة وبدون تغيـر فـي شـكل المنحنى .

ولما كانت نقطة حد المرونة مهمة في التصميم الإنشائي ، فـلا بـد مـن 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 مجمـوع الانفعال الكلي للمادة حتى نقطة الكسر ، ثـم يرسم خـط مـوازي تقريبـا للانفعال المرن الخطي ونقطة تقاطع هذا الخط مع منحنى الإجهاد – الانفعـال وتعرف عندئذ بنقطة الصمود أو نقطة نهاية الانفعال المرن .

g) مقـــاومـــة الشـــد (Tensile Strength)

وهي أقصى مقاومة المادة للحمولات الخارجية المؤثرة عليها فـــي اتجـــاه الشد وتقدر مقاومة المادة بمقدار الحمولة الخارجية مقســـومة علـــى مســـاحة المقطع المستعرض المؤثـــر عليهـــا ، أي أن لها نفس وحـــدات الإجهاد. إن مقاومة المـــادة لإجهادات الشّد (خاصة تلـــك التي تميل للاستطالـــــة) هـــي أفضـــل مقياس لقوة المعدن وتعرف بأنها أقصى جهد يتحمله المعدن ، ولكـــل معدن مقاومة شد معينة تختـــلف عن المعادن الأخرى ، وعـــادة مـــا تقـــاس بوحدات (N/mm^2) وهناك عدة أنواع من مقاومة الشد وهي :

1 - أقصى مقاومة شد للمادة (Ultimate Tensile Strength)

تمثـــل أقصى مقاومة يمكن أن تصل إليها المادة ، ونحصل عليهـــا بقسمة الحمـــل الأقصى على المساحة الأصلية للعينة المختبرة وذلـــك مـــن العلاقـــة التالية :

$$UTS = \frac{P_{\max}}{A_o} \quad \text{.....} (5-3)$$

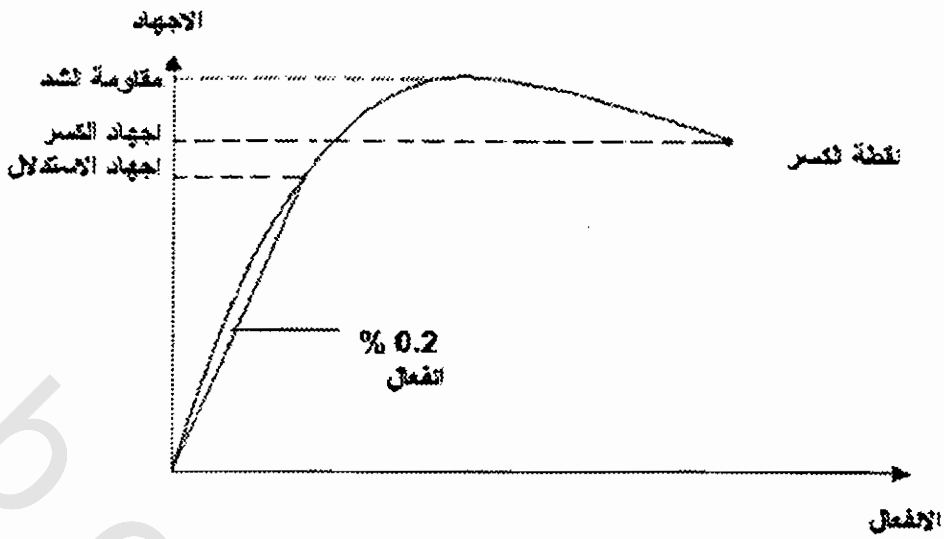
حيث أن :

UTS : أقصى مقاومة شد للمادة (MPa) أو (psi) .

P_{max} : أقصى حمل أثر على المادة (N) أو (p) .

A_o : مساحة مقطع العينة الأصلي(mm^2) أو (in^2) .

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



الشكـــل (3-3)

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

2 - إجهــــاد مقاومة الكسر (Breaking Strength)

وهو مقدار الإجهاد الذي يتم عـــنده كسر الـــمادة نتيجة انهـــيار مقاومتها الداخلية لأية زيادة في الحمولات الخارجية . ويكون مقدار إجهاد الكسر أقـــل من حيث القيمة مقارنة بأقصى مقاومة شدّ . ونحصل على إجهاد الشـــد مـــن قسمة الحمولة المؤثر في لحظة معينة على المساحة السطحية الأصلية .

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

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)

obeikandi.com

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 تحت تأثير الحمولات الخارجية ، وتقدر قيمة الإجهاد الحقيقي بقسمة الحمل المؤثر في العينة على مساحة مقطعها في لحظة تطبيق الحمل وتكون العلاقة على الصورة التالية :

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

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 :

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

أي أن الانفعال الحقيقي يساوي :

$$\varepsilon_{true} = \ln(1+e) \quad \text{.....(9-3)}$$

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) فأن :

مساحة المقطع الأصلي x الطول الأصلي = مساحة المقطع النهائي x الطول النهائي .

أي أن :

$$A_o l_o = A_f l_f \quad \text{.....} \quad (10-3)$$

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

(الطول النهائي / الطول الأصلي) = (مساحة المقطع الأصلية / مساحة المقطع النهائية)

ويمكن التعبير عن قيمة الانفعال الحقيقي بالشكل التالي :

$$\varepsilon_{true} = \ln \frac{A_o}{A} \quad \text{.....(12-3)}$$

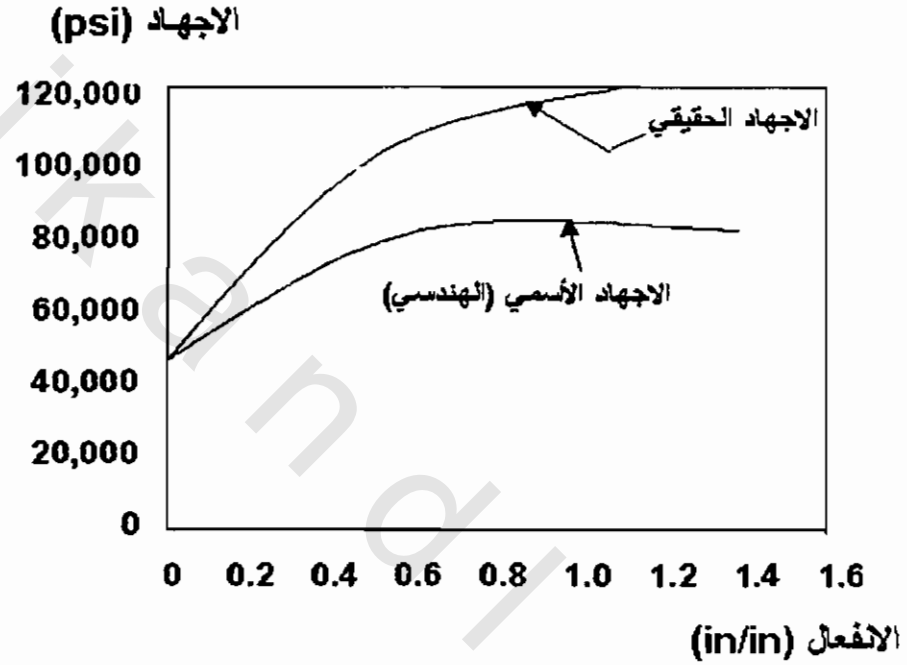
obeikandi.com

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 حالتي 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- تنعكس 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 حالتي 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 المعملية ، 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 ، فانه يستعاض عنه بإجهاد الصمود " الاستدلال " كما سبق توضيحه .

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

4 - مواد عالية اللّدونة (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 تشكيلا لدنا 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) المطيليـــة (Ductility)

هي مقدار التشكل اللّدن الذي يتم في المادة حتى نقطة الكسر ، أو بتعبيـــر آخر هي مقدار قابلية المادة للتشكيل اللدن قبل كسرها. ويمكن التعبيـــر عـــن مطيلية المادة بإحدى طريقتين وهما :

1- النسبة المئوية للاستطالة(Percentage Elongation)

ويرمز لها بالرمز (El%) وتقاس بمقدار التغير في الطول منســـوبا إلـــى الطول الأصلي .

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

أو :

$$Ductility = \frac{\Delta L}{l_o} = \frac{l_f - l_o}{l_o} X 100 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (13-3)$$

حيث أن :

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

l_f : الطول النهائي (mm) أو (in) .

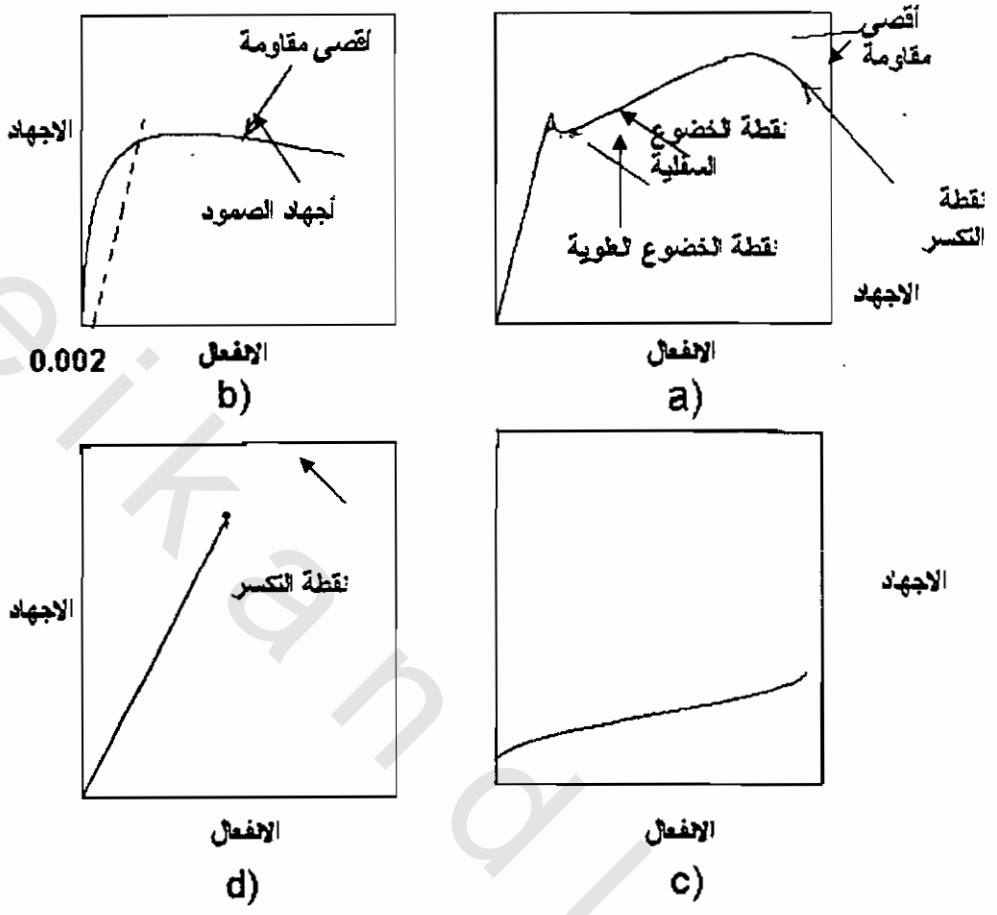
ΔL : مقدار التغير في الطول .

أي أن الاستطالة تساوي :

$$\Delta L = l_f - l_o$$

obeikandl.com

ونظرا لأن مقدار الاستـطالة يعـتمد على طول العينة ، ولغرض التوحيد الـقياسي فلا بد من أخذ عيـنات قياسية من الـمادة عنـد اختبارهـا وهـذه العينات تكون أما طويلة 25cm أو قصيرة 5cm .



الشكل (3-5)

الأشكال المختلفة لمنحنيات علاقة الإجهاد – الانفعال

a) مواد مطيلة صلدة ذات نقطة خضوع واضـحة مثـل الفـولاذ مـنخفض الكربون .

b) مواد مطيلة طرية ليس لها نقطة خضوع ويستعاض عنها بإجهاد الصمود .

c) مواد عالية المرونة كالبلاستيك .

d) المواد القصيفة ويتم كسرها في منطقة اللدونة مثل حديد الزهر .

obeikandl.com

2- النسبة المئوية للاختزال في المساحة السطحية

(Percentage Reduction in Surface Area)

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

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

أو :

$$Ductility = \frac{A_o - A_f}{A_o} \; X \; 100 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (14-3)$$

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 .

obeikandl.com

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

(l) 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 = ل (الحمل) (مقدار تفاضلي من الاستطالة)

أي أن :

Work = ∫(force,p)(increment of extension,d*l*).....(15-3)

$$Work \quad per \quad unit \quad volume \quad = \int \frac{p\, dl}{Al} = \int_{\varepsilon}^{\varepsilon_f} \sigma \, d\varepsilon$$

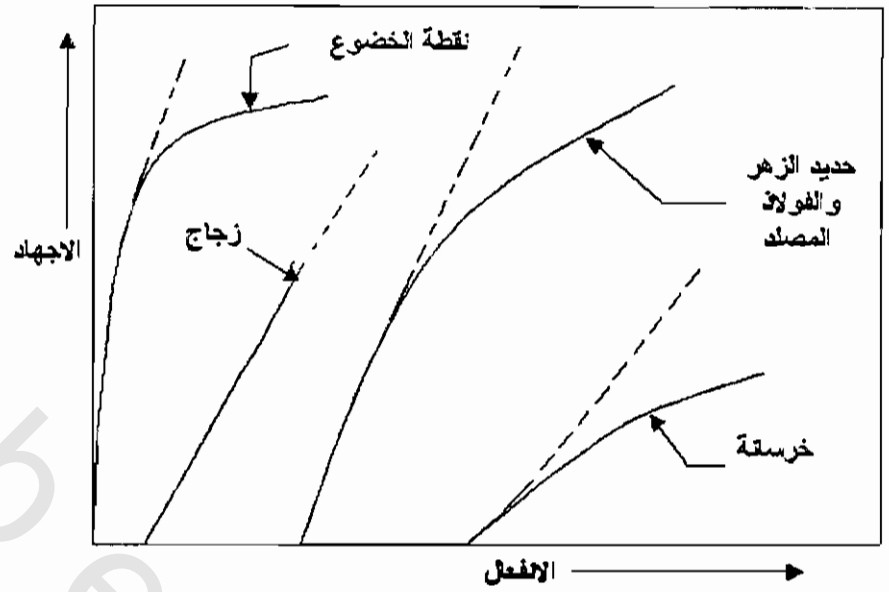
حيث أن :

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 (3-6)

منحنى الأجهاد – والانفعال لاختبارات الانضغاط لعدة مواد

* الخطوط المنقطة تعبر عن المرونة

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

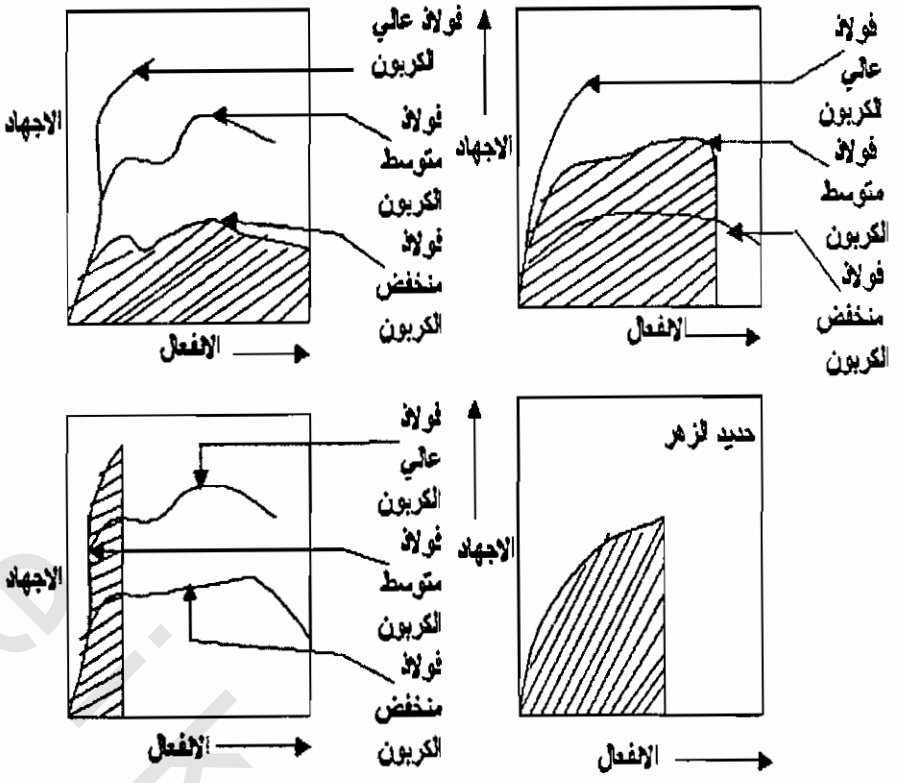
1- إن المواد عالية الصلابة تكون ذات مقاومة ومطيلية عاليتين .

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 (3-7) .

obeikandl.com



الشكل (3-7)

صلابة المواد المختلفة معبراً عنها بالمساحة تحت منحنى الأجهاد – والانفعال

(m) الصـــلادة (Hardness)

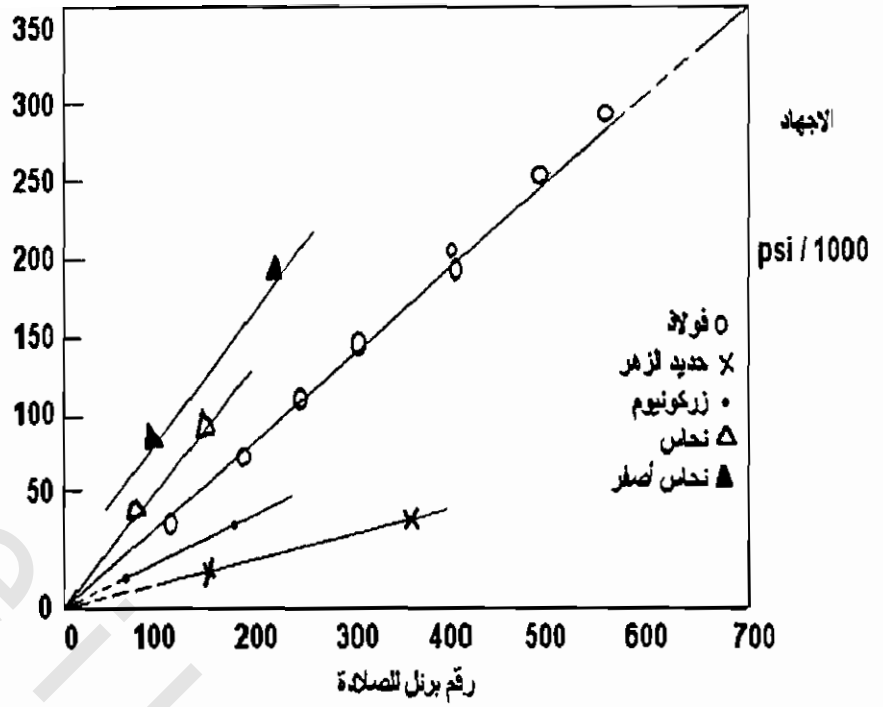
تعرف الصلادة من خلال عدة تعاريف ، حيث أنه لا يوجد هناك تعريـف واحد محدد ومتفق عليه للصلادة . ويرجع ذلك إلـى حقيقـة إن اسـتخدامات الصلادة التجارية لا تقيس خاصية ميكانيكية متأصلة في المادة ، ولكنها اختبار اختياري لقياس تصرفات المادة عند ظروف معينة ، وإن كان هناك تعريـف يمكن وضعه فهو " الصلادة هي مقدار مقـاومة المادة للتشكيـل أو الخدش أو الحـك أو وضع علامة عليها " والتعريف الآخر الأكثر شيوعا للصلادة هـو أنها مقاومة المادة للاختراق بمادة أخرى ، ويمكن تعريفها أيـضا بأنها مقاومة المادة للخدش أو التثليم بتأثير ضربة أو حمولة مثبتة .

إن مقاومة الخدش تقاس وفق سلّم موس وهو سلّم 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 سلّم موس المعدّل مضافا إليه **9** معادن أخرى كنقاط مرجعية و تقاس مقاومة التثليم وفق سلالم 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 الموضوعة ، 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 اللّدن لها .



الشكل (3-8)

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

(n) **الزحـــف** (Creep)

يعرف الزحف بأنه التشكل (التشوه) اللدن الذي يحدث في المـــادة بتـــأثير الزمن عند درجات الحرارة العالية نتيجة الأجهادات المرنة الواقعة والمـــؤثرة عليها . أو هو التغيير في الشكـــل ، أو تمدد المعدن تحت تـــأثير أي إجهاد أو قوة خارجية لفترة طويلة من الزمن عند التعـــرض لدرجـــات حرارة عـــالية لبعض المواد مثل الرصاص والقصدير . فعندما يؤثر إجهاد ثابت مقـــداره σ على مادة ما لفترة زمنية طويلة عند درجة حرارة عالية ، حتـــى لـــو كانـــت بمقدار نصف درجة أعلى من درجة الانصهار ، فإن المـــادة ســـوف تتشـــكل تشكلا لدنا بغض النظر عن مقدار الإجهاد المؤثر حتى وإن كان أقل من إجهاد

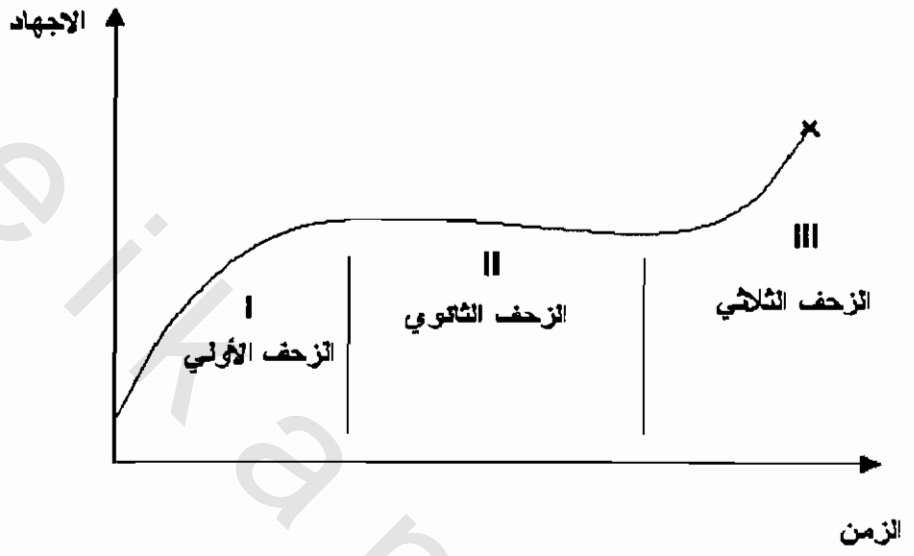
الخضوع . ومن مظاهر الزحف ، الاستطالة ، اللدونة ونقص مساحة المقطع المستعرض بالقرب من منطقة الكسر في اختبار الشّد للمعادن القابلة للمطاولة . ويعد الزحف أحد أهم الخواص الميكانيكية التي يتم على أساسها اختيار المادة المناسبة للاستخدام عند درجات الحرارة العالية . على سبيل المثال ، يمكن أن يؤدي التشكيل الحاصل عند درجات الحرارة العالية 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 خاصية 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 :

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

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

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

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

(o) الكـــلال والتعـــب (Fatigue)

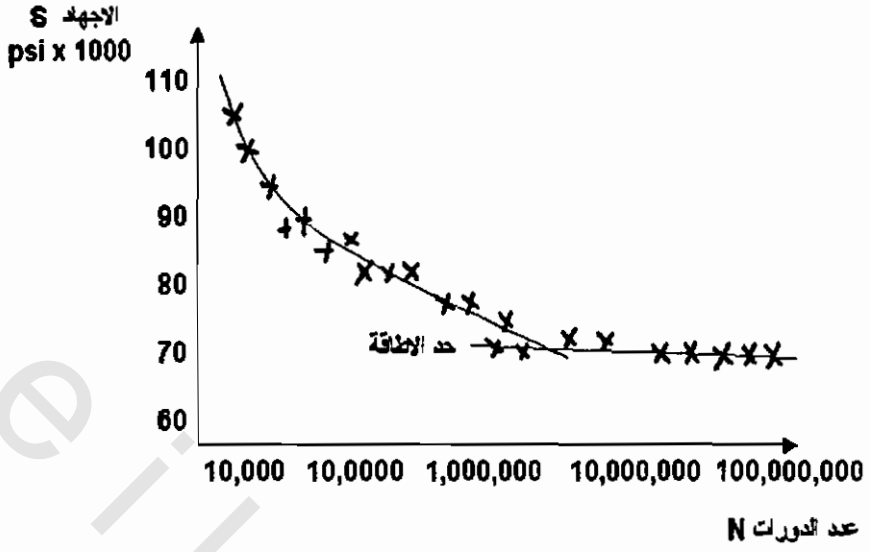
يمكن للمادة تحمل ومقاومة الأحمال الخارجية لفترة طويلة ، ولكنهـــا قـــد تنهار فجأة بعد فقدانها القدرة على التحمل ، ولهذا يعرف انهيار الكـــلال بأنـــه الانهيار الناتج عن إجهاد المادة وعـــدم قـــدرتها علـــى التحمـــل أكثـــر مـــن ذلك . وتختلف مقاومة المادة حسب الأجهادات فتقـــل مقاومة المادة إذا كانـــت مترددة وليست إجهادات ثـــابتة وغالبا ، فإن الأجهادات المؤثـــرة فـــي حالـــة الكلال هـــي إجهادات دورية .

ويعـــرف الكلال أيضا بأنـــه مقاومة المادة للانهيـــار نتيجـــة تعرضـــها للإجهادات المترددة دوريا ونقصان كفاءة المادة ذات الإشعاع الضوئي نتيجـــة إثارتها ، أو كما تم تعريفه في الباب الأول بأنه تكسر المواد المعرضـــة إلـــى أحمال متكررة تحت تأثير إجهادات أقـــل بكثيـــر مـــن المقاومـــة القصـــوى لها . ويظهر عادة في المعادن التي لها علاقة بالتحميل الدوراني أي المعـــدات الدوّارة مثـــل المضخات والضاغطات .

وعند انهيار المادة تحت ظروف الاستخدام الـــمشار إليها أعلاه ، يظهـــر في ملامح الكسر عندئذ كل من الانهيار القصيف ، والانهيار المـــرن . ومـــن أشهر الأمثـــلة على كسر المادة بتـــأثير الكـــلال عمـــود الإدارة المتـــردد ، وتوربينات القوى ، وبعض الأجزاء الميكانيكية الأخرى بعد العمـــل لفتـــرات طويلة .

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

ويوضح الشكل (3-10)عدد دورات الإجهاد التي يتعـرض لهـا الفولاذ قبـل أن ينهار .



الشكل(3-10)

العلاقة بين الأجهاد وعدد الدورات (S - N) لاختبارات الكلال لسبيكة من الفولاذ

ويتضح من الشكل ما يلي :

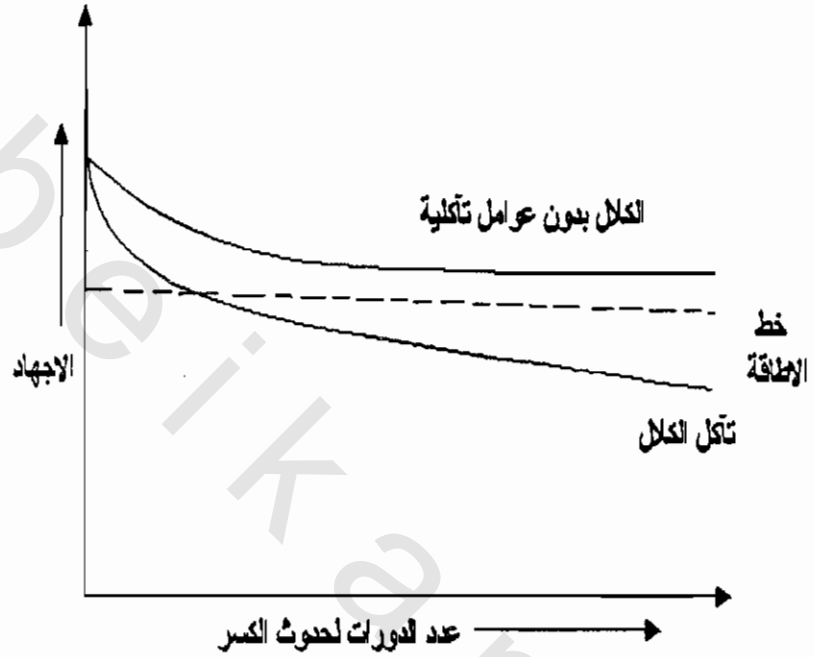
1- إن زيادة مقدار الإجهاد المؤثر على المادة يحد من تكرار تعرضـها لهـذا الإجهاد قبل فشلها ، أي أنه يقلل عدد الدورات التي تتعرض لها المـادة قبـل فشلها .

2- إن زيادة عدد دورات التعرض للإجهاد المؤثر يتطلـب أن يكـون ذلـك الإجهاد صغير المقدار وأقل من إجهاد الخضوع . ويعني ذلك أن زيادة عـدد دورات الإجهاد في ماكينة ما أو في أي جزء منها يستلزم تخفيض مقدار ذلـك الإجهاد والعكس صحيح .

وتعرف أعلى قيمة من الإجهاد يمكن أن تتعرض له المادة دون أن تنهار " حد الإطاقة " أو (indurance limit) أو جهد الكلال (Fatigue Limit)

obeikandi.com

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



الشكل (3-11)

تأثير عوامل التآكل على أجهادات الكلال للفلزات

3.3 تأثير درجة الحرارة على الخواص الميكانيكية
(Effect Of Temperature on Mechanical Properties)

من المعروف أنه عنـد زيادة درجـات الحرارة تقل مقاومة المعدن للشـد وكذلـك مقاومة الخضوع ، وكمثال على ذلك فإن مقاومة الشّد للفولاذ المقاوم والذي لا تزيد نسبة الكربون فيه عن 0.25 هي $450\ N/m^2$ عند درجة حرارة 25 درجة مئوية وتقـل إلى قيمـة $210N/m^2$ عند درجة حرارة 50 درجـة مئوية .

obeikandl.com

4.3 التـــآكـــل (Corrosion)

في هذا البند يكن الإشارة إلى أحد الأنواع المهمة للتآكل وهو التآكل المنتظم الذي يعني ضياع كتلة المعدن بشكـــل منتظم دون حدوث نقـــر أو أشكال تدل على حدوث مهاجمة موقعية ، ومن أنـــواع التآكل الأخرى الجلفاني والنقـــري والداخلي الحبيبي والجهدي والفرضي . وسيتم التطرق الى موضـــوع التآكـــل بشكـــل تفصيلي في البـــاب الرابـــع من هذا الكتاب .

5.3 الاختبـــارات الميكانيكيـــة (Mechanical Tests)

تعد الاختـــبارات الميكـــانيكية من أقدم الطرق المستخدمة للتعرف علـــى خـــواص المواد ، إذ أنها طبقت بعد التعرف على قانون هوك ، والذي وضـــع في القرن السابع عشر وكان الأساس والقاعدة لعـــدد كبيـــر مـــن الخـــواص الميكانيكية. ثـــم كانت الثـــورة الصناعية بعد ذلك والتي كـــان مـــن نتائجهـــا التوصـــل إلـــى الاختبـــارات الميكانيكيـــة التـــي تجـــرى للمـــادة لتحديـــد مواصفاتها .

في الوقت الحاضر ومع ازدياد عجلة التـــطور لوسائـــل الحيـــاة ، خاصة في وسائط النقل الجوي ، وتوصيل اليابسة بالجســـور الضـــخمة ، واســـتخدام السفن والبواخر الكبيرة في البحار والمحيطات وازدياد المعروض من الفلزات على شكل سبائـــك الأمر الذي أملى على المهنـــدس المصمم تحديد ووصـــف خواص المادة بشكل دقيق ، وحـــتى يكون المهندس المصمم على بينـــة مـــن أمره في اختيار المادة المناسبة ، ومع التوسع الكبير في استخدام المفـــاعلات النووية والاهتمام بالأمان النووي ، دعت الحاجة إلى مواد ومركبـــات جديـــدة 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 كمّا ، 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 ضـــرورة توحيـــد الأجهـــزة المستخدمة وطرق القياس المستعملة ومواصفات العينة المقاسة وما شابه ذلـــك ولقد وضعت الجمعية الأمريكيـــة للاختـــــبارات والمـــواد A.S.T.M أي (American Society For Testing and Materials) ، وكذلك مؤسســـة المقـــاييس البريطانيـــة BSI (British Standards Institution) وهيئـــــة المواصفـــات والمقاييس الألمانية DIN وكذلك هيئة المواصـــفات والمقـــاييس السعوديـــة SASO مواصفات قياسية للاختبارات الميكانيكية .

ولسوء الحظ فقد حصل تباين واضح بين هذة المواصفات ، حيـــث يوجـــد اختلافات في بعض تلك المواصفات ومع ذلك يميل التوجه العالمي الآن إلـــى التوحيد القياسي للحد من تلك الاختلافات . ومن أهم الاختبـــارات الميكانيكيـــة التي تجرى على المواد والتي سوف يتم التعرض لها فـــي هـــذا البـــاب هـــي الاختبارات التالية :

1. اختبارات الشّد والانضغاط .
2. اختبار الصلادة .
3. اختبار مقاومة الصدمات .
4. اختبار الانحناء .
5. اختبار الكلل 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 الاختبـــار على المادة هـــو التـــأكد مـــن مطابقـــتها للمواصفات سواء خلال مراحل الإنتـــاج أو مراحـــل الاســـتخدام العملي . ومن أهم أنواع تلك الاختبارات المذكورة أعـــلاه هـــي الاختبـــارات 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 والمصنّع أن إنتاجه مطابق للمواصفات الموضوعة ، وهي مهمة أيضا للمصنّع 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 أجهـزة ومعدات خـاصة ذات درجة عالية من الدقة تجهز بها المصانع الكبيرة أو جهات الأبحاث المهتمة باكتشاف المواد وتطويرها .

3.6.3 اختبـارات متـلفـة (Destructive Tests)

ينتج عنها تحطيم جزء من المادة قيد الاختبار جزئيا أو كليا ، ولذلك فإن هـذه 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 جـزء مـن المنتج وليس كله ولهذا فإنها لا تعطي دلالة واضحة في أغلب الأحيـان عـن مواصفات المنتج .

تستخدم الاختـبارات المتلفة أساسا كـأحد أنواع الاختبارات الوتيرية فـي المصانـع ، وذلك للتأكد من مطابقـة المواد للمواصفات أو التغيـرات التـي تحدث فيها أثناء خطوات التصنيع ومراحلها المختلفة . وتجـرى الاختبـارات المتلفة على عينات صغـيرة معدة خصيصا لهـذا الغرض طبقـا للمواصفات المناسبة أو الخاصة بكل مصنع . وعندما يكون المطلوب التأكد مـن نوعيـة المادة المستخدمة وخواصها في منشأ كبيـر أو جهـاز ضخـم ، فـان الاختبار يجرى على نموذج تمثيلي له مصنوع من المادة نفسها ، ويجـب أن تكون العينة ممثلة تماما للمادة المستخدمة في إنشاء الجهاز .

4.6.3 اختبـارات غير متلفـة (Non-Destructive Tests)

غالبا ما تجرى وتنفذ مثل هذه الاختبارات من أجل الأهداف التالية :
a) اختبار الأجزاء أو المركبات النهائية أو كليهما .

obeikandl.com

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)

غالبا ما تتبع هذه مجموعة الاختبارات غير المتلفة ، ونعني بها اختبار جميع الأجزاء وفحصها عند أقسى 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 نظرا لأن فشلها أثناء الخدمة هو ذو خطورة كبيرة . ومثال آخر على اختبارات الإثبات هو اختبار الصلادة ، الذي يجرى 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 ، وغالبا ما تكون النتائج نوعية وليست كمية . ويتراوح الفحص في هذه الاختبارات ما بين الفحص الخارجي بمجرد النظر للتأكد من الأبعاد

obeikandl.com

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 الشّد 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(3-1) تقدير معامل المرونة ونقطة الخضوع وإجهاد الصمود ، وكذلك أقصى مقاومة للشّد .

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

الهندسية ، عند إجراء اختبار الشّد ، 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 ±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 منحني الإجهاد - الانفعال .

وتقاس أبعاد العينة قبل بدء الاختبار وبعده ، ومنها يمكن الحصول على النسبة المئوية لخفض المساحة السطحية والنسبة المئوية للاستطالة بالنسبة لمدلول 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)

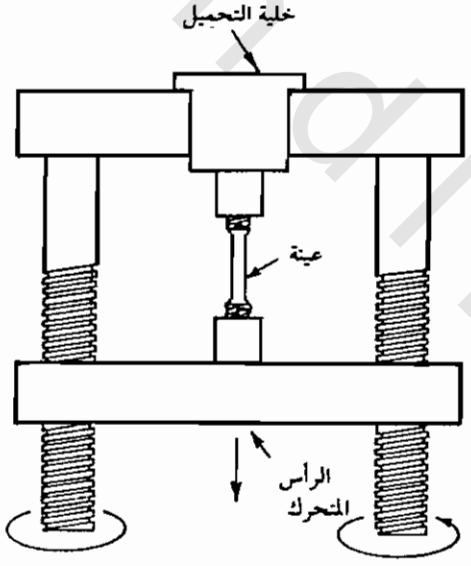
إن عمل ماكينات اختبار الشد هو تكريس الحمل على العينة مع قراءة ذلك الحمل بدقة . وتوجد عدة أنواع تجارية مختلفة من تلك الماكينات . ويمكن تقسيمها إلى نوعين رئيسيين هما الماكينات المنضدية السطحية ، وماكينات التحميل الهيدروليكي أو اللولبي وهي ما تعرف بالماكينات الكبيرة .

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 مبين مدرّج .

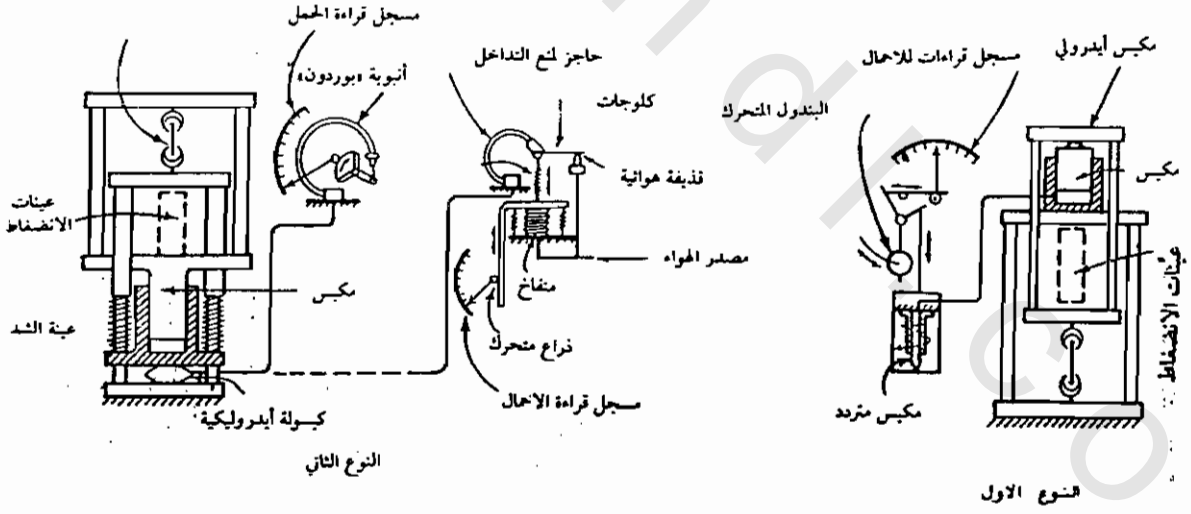


الشكل (3 - 12)

مقطع في ماكينة اختبار الشد المنضدية

وبزيادة التحميل فإن القراءة تتزايد تلقائيا مع البندول ، ويظهر ذلك على القرص المدور ، وفي الوقت الحالي تم إدخال معدات إلكترونية لتسجيل الإجهاد والانفعال الحادثين عند أي حمل معين ، وتكون لهذه المعدات الإلكترونية فائدة كبيرة خاصة في الأحمال العالية والتي يتم فيها تغيير الحمل بسرعة كبيرة ، كما يمكن لتلك الأجهزة رسم العلاقة بين الإجهاد والانفعال مباشرة . وتتكون ماكينات الاختبار العام من ثلاثة أجزاء رئيسية هي الرأس العلوية وهي ثابتة ، والرأس السفلية (يمكن ضبطها) ، ومنضدة بها الكابس الهيدروليكي .

وفي اختبارات الشد تمسك العينة بين الرأس العلوية والرأس السفلية ، أما في اختبارات الانضغاط والانحناء فإن العينة توضع بين الفك السفلي والمنضدة . ويمكن تحريك الفك السفلي وضبطه بالنسبة للمنضدة أو الفك العلوي . ويوضح الشكل (3-13) ماكينات الاختبار العام وأجزائها المختلفة .



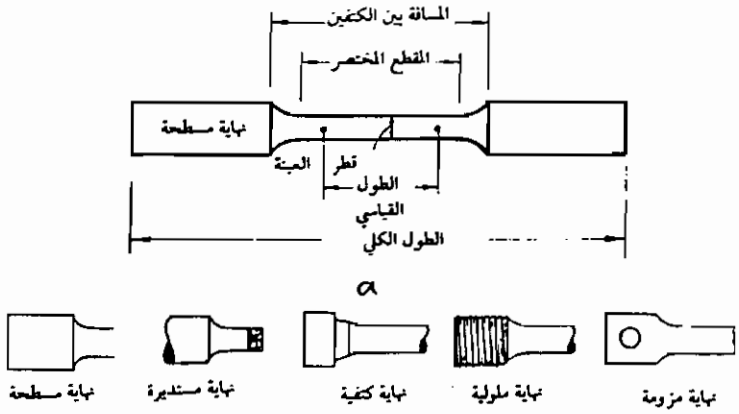
الشكل (3 - 13)

رسم تخطيطي لنوعين مختلفين من ماكينات اختبار الشّد

توجد في الوقت الحالي ماكينة للاختبارات الميكانيكية العامة وهذه تعرف باسم ماكينة انسترن (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 تلقائيا وكذلك يمكن تغيير الحمل دورياً ، ويوجد بها معدة إلكترونية لقياس الانفعال الإلكتروني من خلال تكبير الانفعالات الحادثة ، وبالذات في منطقة المرونة حيث يكون الانفعال صغيرا للغاية ولمئات المرات وذلك عن طريق تكبير الإشارات القادمة من المادة إلى مسّجل الانفعال ، وبهذا تكون المنحنيات أكثر وضوحا.

ويمكن استبدال تلك المعدة الإلكترونية بمعدة أخرى مختلفة التدريج حيث يوجد العديد منها وبتدريجات حسب نوع الفلز المختبر,كما يصلح بعضها الآخر في اختبارات المواد السيراميكية والبلاستيك . ولما كانت دقة نتائج اختبارات الشد تعتمد كثيرا على كيفية اختبار العينة وطريقة تحضيرها وكذلك على أبعاد تلك العينة ، لذا يكون مهماً تحضير العينات بدقة والالتزام بالمواصفات 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 نظرا لأن الانفعال ودقة النتائج تعتمد على طول العينة وشكل الأطراف .

وتكون معظم العينات إما مدوّرة أو مسّطحة المقطع . وبالنسبة للعينات المدوّرة ، فإن النهايات تكون أما نهاية ذات كتف ، أو نهاية لولبية ، أو نهاية عادية بينما تكون أطراف العينات المسّطحة 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)

أشكال العينات المستخدمة في اختبار الشد

a) تفاصيل أبعاد العينة b) الأنواع المختلفة لنهايات العينة

جـــدول (3 - 1)

الأبعاد القياسية لعينات اختبار الشدّ (*)

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

مقطع المقبض بالأنج	2 أنج	ـــــ	1,375 أنج	$\frac{3}{4}$ أنج	2 أنج
العرض أو القطر بالأنج	$\frac{3}{4}$ أنج	ـــــ	$\frac{3}{4}$ أنج	$\frac{23}{32}$ أنج	$\frac{3}{4}$ أنج
قطر الفتحة,أنج	ـــــ	ـــــ	ـــــ	ـــــ	نصف أنج
بعد الطرف ,أنج	ـــــ	ـــــ	ـــــ	ـــــ	أنج ونصف
البعد عن فتحة اللولبة,أنج	ـــــ	ـــــ	ـــــ	ـــــ	أنج ونصف

(*) 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 .

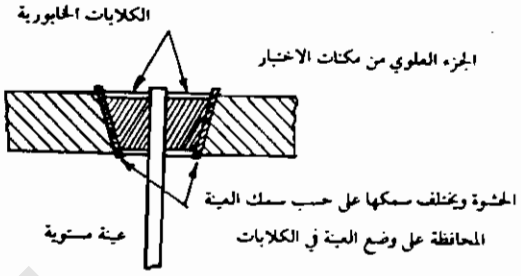
4 - نوع خاص – تستخدم لاختبارات المطاط ، والأقمشة ، والبلاستيك والألياف وكذلك الأسلاك .

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

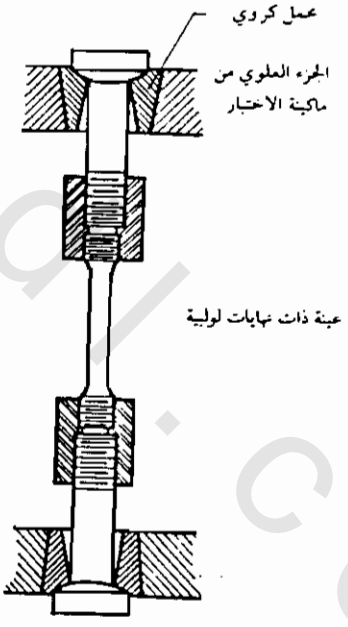
a) أن تكون العينة في وضع رأسي تماما حتى تكون كلّ الأحمال والتحميل في وضع رأسي، ويكون الإجهاد الناتج في اتجاه محوري .

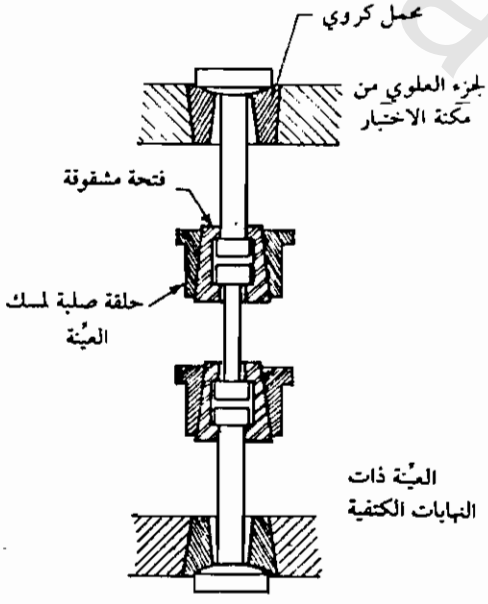
b) تقدير سرعة تحميل العينة جيدا وبعناية ، حيث تختلف سرعة التحميل حسب نوع المادة المختبرة ، وكذلك تختلف سرعة التحميل قبل نقطة الخضوع وبعدها . وتكون سرعة التحميل للفلزات 2mm

(0.125in) ، للدقيقة حتى نقطة الخضوع ، ثم تزيد بعد ذلك لتصل إلى 8mm (0.5in) ، 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 للكلاّبات المستخدمة لمسك العينات

مثـــال (3-1)

أجري اختبار الشّد على عينة من مادة ما ، ولقد كان قطر العينـــة قبـــل إجراء الاختبار 0.500in ، أما الـــقطر النهائي بعد الانـــــتهاء مـــن إجـــراء الاختبار فكان 0.455in . فإذا كان مدلول الطول القياسي 2in ، ثـــم بلغ هذا 2.270in بعد إجراء الاختبار . والمعلومات التي ســـجلت أثنـــاء التجربـــة موضحة في الجدول (a).

الجدول (a) الخاص بالمثال (1-1)

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

المطلوب من البيانات السابقة إيجاد ما يلي :

a) مقدار الأجهادات المناظرة للأحمال المؤثرة .

b) مقدار الانفعال المناظر لكل إجهاد .

c) رسم العلاقة بين الإجهاد والانفعال بيانيا .

d) معامل المرونة .

e) إجهاد الحد التناسبي (إجهاد الخضوع) .

f) مقاومة المادة للشّد .

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 .

الحـــل :

المساحة السطحية الأولية تساوي :

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

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

أما المساحة السطحية عند الكسر :

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

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

a) الإجهاد عند كل حمولة يعطى حسب العلاقة التالية :

الأجهاد = الحمولة/المساحة الأولية

أي أن :

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

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

obeikandl.com

b) الانفعال وهو :

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

ومقادير الانفعالات الحادثة موضحة ايضاً 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 :

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

e) حد المرونة أو جهد المرونة هو نهاية العلاقة الخطية بين الإجهاد والانفعال ومن الشكل (3 -16) ، يتبين أن حد المرونة هو (60.79×10^{3} psi) .

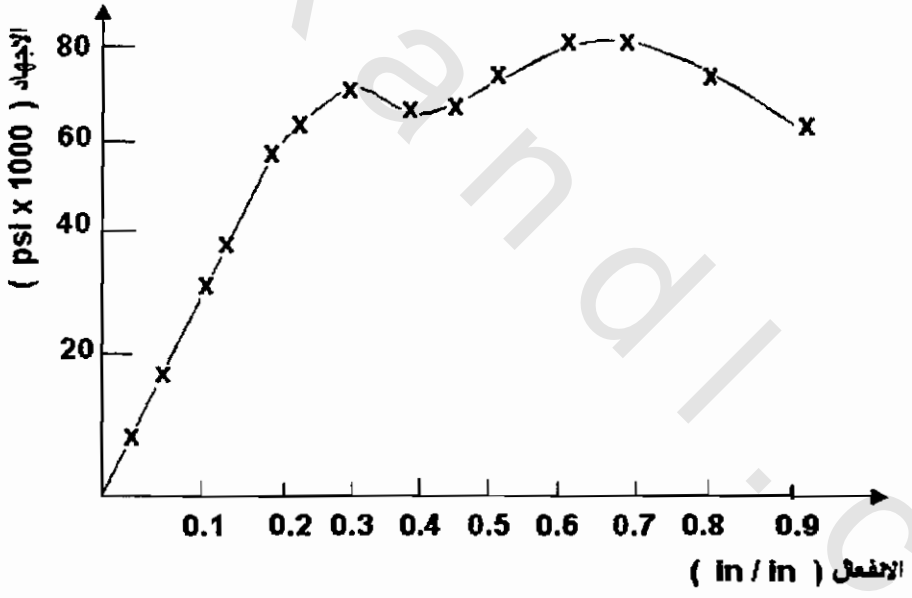
f) مقاومة المادة يتم الحصول عليها من العلاقة بين الإجهاد – والانفعال الموضحة في الشكل (3-16) ، وقيمة مقاومة الشّد هي أكبر قيمة يصل إليها إجهاد الشّد وعلى هذا الأساس ، فإن مقاومة المادة للشّد تساوي (76.025×10^{3} psi) .

obeikandi.com

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 :

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



الشكل (3-16)

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

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

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

أو :

$$Percentage \quad Elongation = \frac{2.270 - 2.000}{2.000} x\ 100$$

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

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

أو :

$$Percentage \ \text{Re}duction \ in \ Area = \frac{A_o - A_f}{A_o} x\ 100$$

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

الجدول (b) الخاص بالمثال (1-1)

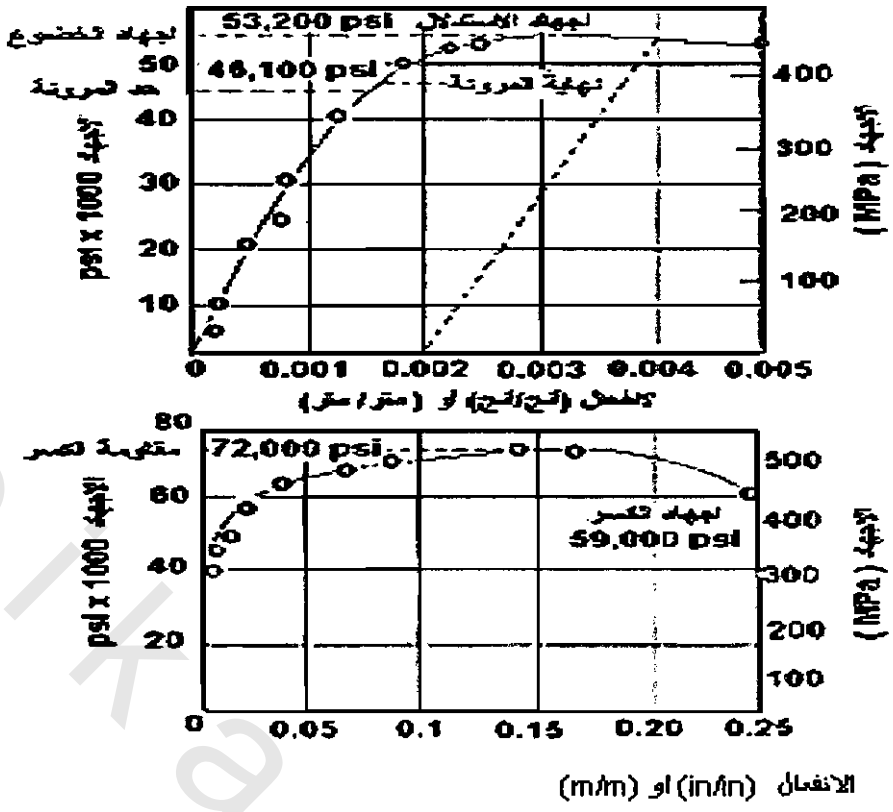
الحمل (باوند)	الإجهاد (باوند/أنج^2)	الاستطالة (أنج)	الانفعال (%)
1,000	5,096	0,00032	0,016
2,000	10,191	0,00064	0,032
4,000	20,382	0,00127	0,064
5,000	25,478	0,00159	0,080
6,000	30,573	0,00191	0,096
8,000	40,764	0,00255	0,128
10,000	50,955	0,00318	0,159
11,930	60,790	0,00380	0,190
11,970	60,993	0,00390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

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

مثـــال (3-2)

أجريت تجربة لاختبار الشد على إحدى المـــواد والتـــي أعطـــت النتـــائج الموجودة في الشكل (3-17) بالاستفادة من المعلومات المبينـــة فـــي الشـــكل أوجد :

a) معامل المرونة .
b) جهد الخضوع (الحد التناسبي) .
c) أقصى مقاومة للمادة .
d) مقاومة الكسر الهندسية .
e) مقاومة الكسر الفعلية .
f) إجهاد الموازنة عند 0.2% (إجهاد الاستدلال) .
g) النسبة المئوية للاستطالة .
h) نسبة النقص في المساحة السطحية .



الشكل (17-3)

علاقة الأجهاد – والانفعال للمثال (3-2)

الحـــل :

a) معامل المرونة " E " هو ميـــل الجزء المستقيم من منحني العلاقـــة بـــين الإجهاد والانفعال. ومن الشكل (3-17) نستنتج أن الميل هو :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{35\ ,000}{0\ .00175} = 2\ x\ 10^{\ 7}\ \ psi$$

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

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.) ، تقدّر 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 :

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

ولحساب الحمل عند هذه اللحظة – لحظة الكسر – فإن :

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

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

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

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

وهي قيمة مقاومة الكسر الحقيقية للمادة .

f) يقدّر 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 .

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

g) النسبة المئوية للاستطالة تحسب من القانون التالي :

$$PercentageElongation = \frac{l_f - l_o}{l_o} x100 = \frac{2.32 - 2.00}{2.00} x100 = \%16$$

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

$$PercentageReductionin\ Area = \frac{A_o - A_f}{A_o} x100$$

$$= \frac{\frac{\pi}{4}(0.503)^2 - \frac{\pi}{4}(0.455)^2}{\frac{\pi}{4}(0.503)^2} x100$$

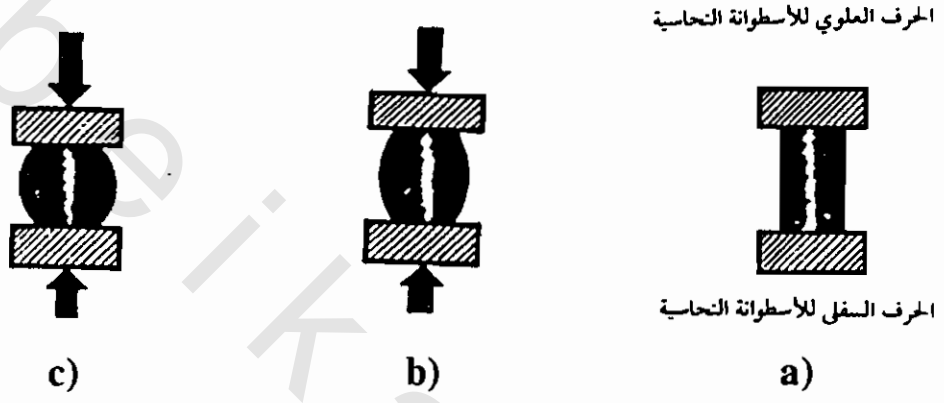
$$= \%18$$

2.7.3 اختبار الانضغاط (Compression Test)

يمكن القول أن اختبار الانضغاط هو عكس اختبار الشّد 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 الشّد . 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

obeikandi.com

اختبار الانضغاط عليها هي حديد الزهر والخرسانة المسلحة والملاط والطوب والخـــزفيات والخشب ، فمن المعلوم أنه يستحيـــل إجراء اختبار الشّد علـــى المواد الـــمذكورة مبـــاشرة نظرا للصعوبات في تصميم الماسكات التي يمكن بها تثبيت العيّنة في جهاز الشّد . إن التغير الحـــادث عنـــد إجـــراء اختبـــار 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 محـــور واحد وذلك بسبب صعوبـــة وضع العينة في المركز بصورة تامة ، ولهذا فقد أدخل تعديل على شكـــل طرفي العينة للتـــأكد من أن اتجاه الحمولـــة هـــــو رأسي ، كما هو موضح في الشكل (3-19) ، إضافة إلى وضع طربوش فـــي نهاية العينة .

2- يتولد في العينة في معظم الحالات إجهاد انحناء أثناء اختبـــار الانضـــغاط اعتمادا على طول العينة ، ولكن يمكن التغلب علـــى ذلـــك باختيـــار الأبعـــاد

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

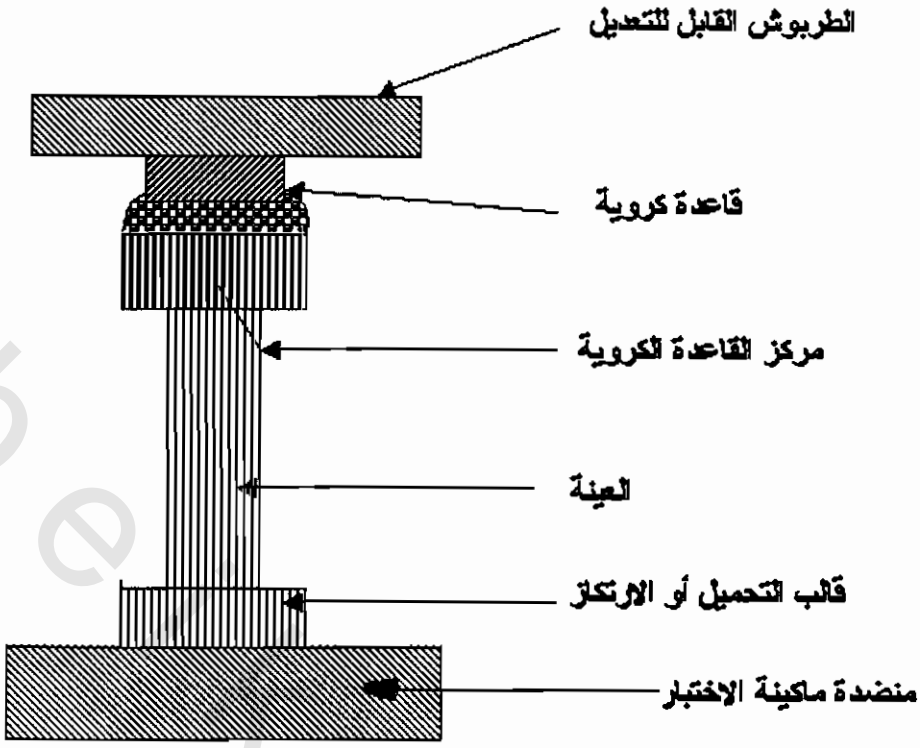
a) العينات القصيرة : الطول = 0.9 من القطر
b) العينات المتوسطة : الطول = 3 أمثال القطر
c) العينات الطويلة : الطول = 8 أمثال القطر

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

3- يؤثر الاحتكاك إلى حد كبير ما بين سطح العينة والفك السفلي لماكينة 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 للفلزات والسبائك ألا في حالات قليلة وبالذات للمواد الفلزية القصيفة .

obeikandl.com



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

3.7.3 اختبـــار الصـــلادة (Hardness Test)

إن الصلادة كما ذكرنا سابقا هي مقاومة المادة للخدش أو الاحتراق بمـــادة أخرى . وبالتالي فإن هذه الخاصية تعتمد على خواص أخـــرى للمـــادة منهـــا معامل المرونة ومقاومة الشّد ونقطة الخضوع والمطيلية . ولهذا فإن تقدير رقم الصلادة لمادة يمكن أن يعطي مؤشرا للخواص الميكانيكية الأخـــرى.ويمتـــاز اختبار الصلادة بما يلي:

1 - يدخل ضمن الاختبارات غير المتلفة ، لذلك يمكن استخدامه للمـــواد فـــي 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 والميكانيكيـــة على المادة من خلال هذا الاختبار دون تلف المادة .

4- يمكن عن طريقه تقدير مقاومة المادة للشّد دون إتــلافها وذلك من العلاقة بين الشّد والصلادة .

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

$$T.S. = 500\,x\,BHN \ ....(16-3)$$

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

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

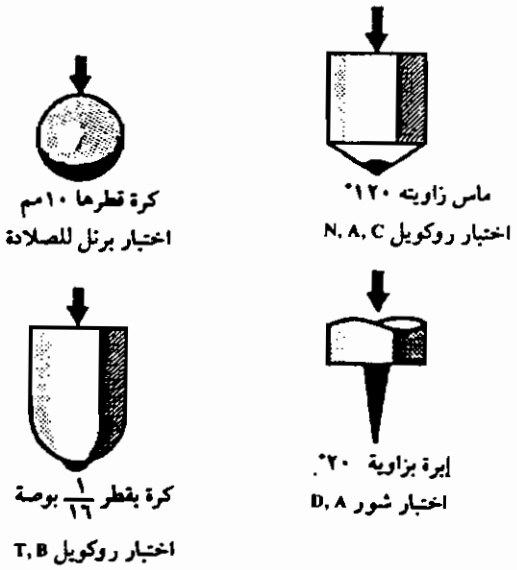
حيث أن : .T.S = مقاومة الشد بالوحدات الموضحة في كلا المعادلتين .

BHN = رقم برنل للصلادة .

5 - إمكانية إجراء الاختبار في موقع العمل لتوفر بعض الأجهزة الخفيفة التـــي يمكن نقلها إلى حيث توجد المواد المطلوب اختبارها. وتوجد العديد من طـــرق قياس الصلادة موضحة في الجدول (3-2) ، ويعتمد رقم الصــــلادة الناتج من الــقياسات على الطريـــقة المتبعة وكذلك الخواص الفيزيائية للــمادة . وأكثر طرق اختبارات الصلادة استخداما هي طريقة " برنـــل " وطريقة " روكويل " وطريقة " فيكرز " إضافة إلى مقياس الصلادة الدقيقة و كذلك الاسكليروسكوب (كشاف الــصلادة النسبية) ، والاختلافات الأساسية بين الطرق هـــي فـــي طريقة التحميل ونـــوع المخترق . وبعض أنواع المخترقات المســـتخدمة فـــي اختبارات الصلادة موضحة في الشكــل (3-20) . وفيما يلـــي نقـــدم مـــوجز للقياسات التي سبق ذكرها.

جدول (3 - 2) مقارنة بين الطرق الرئيسية لاختبارات الصلادة

الخاصية	برنل	روكويل	فيكرز	الصلادة الدقيقة	خصائص الصلادة المستخدمة الأخرى
المخترق	كرة قطرها 10 مم وتستخدم كرة قطرها 5 مم للعينات الرقيقة	مخروط 120 درجة وكرات أقطارها $\frac{1}{6}$ ، $\frac{3}{8}$ ، $\frac{1}{2}$ إلخ	هرم زاوية رأسه 136 درجة	كلوب زاوية الرأس 136 درجة	مطرقة يقذف بها من ارتفاع معين
الأحمال المستخدمة	500 , 1500 , 300 كيلوجرام	في العادة 10 كجم ،حمل صغير،60 كجم،100و150 كجم للأحمال الكبيرة. للاختبار السطحي حمل صغير 3 كجم حمل كبير 4565 كجم	يتراوح من 1 كجم إلى 120 كجم ولكن في المتوسط هو 3 - 5 كجم	يتراوح الحمل ما بين 1 جرام إلى 1 كيلوجرام.	
مقاييس الصلادة	مقياس واحد	هناك 15 مقياس للاختبارات الداخلية أكثرها استخداما المقياس B و G في الجدول في المدحق والاختبارات السطحية هناك خمسة مقاييس أشهرها مقياس C	مقياس واحد	مقياس واحد	مقياس واحد
التطبيقات الأساسية	تستخدم مع الأجزاء الرئيسية والثقيلة كما في فولاذ الإنشاءات والمسبوكات الضخمة والمطروقات الكبيرة	للأجزاء الفلزية الصغيرة المشكلة أو كامة التصليع مثل الألواح الفلزية والأسلاك وأدوات القطع والتشغيل والتروس والصمامات والأجزاء البلاستيكية.	تستخدم للأغراض نفسها إضافة إلى استخدامها لأجزاء التشكيل الرقيقة بسمك 0.005 ألج	تستخدم غالبا للمواد ذات الصلادة العالية والرقيقة جدا مثل الزجاج والسطوح المطلاة والرقائق و حبيبات المادة.	يستخدم تقريبا لكل شيء وللأجزاء الصغيرة والكبيرة والرقيقة والسميكة وللمركبات الفلزية وغير الفلزية
سطح العينة	سطح نظيف ومستوي	لا بد أن يكون السطح ناعم وأملس	لا بد أن يكون السطح ناعم وأملس ونظيف	لا بد أن يكون السطح نظيف جدا وملمعا ومستويا	المطلوب سطح أملس و نظيف.

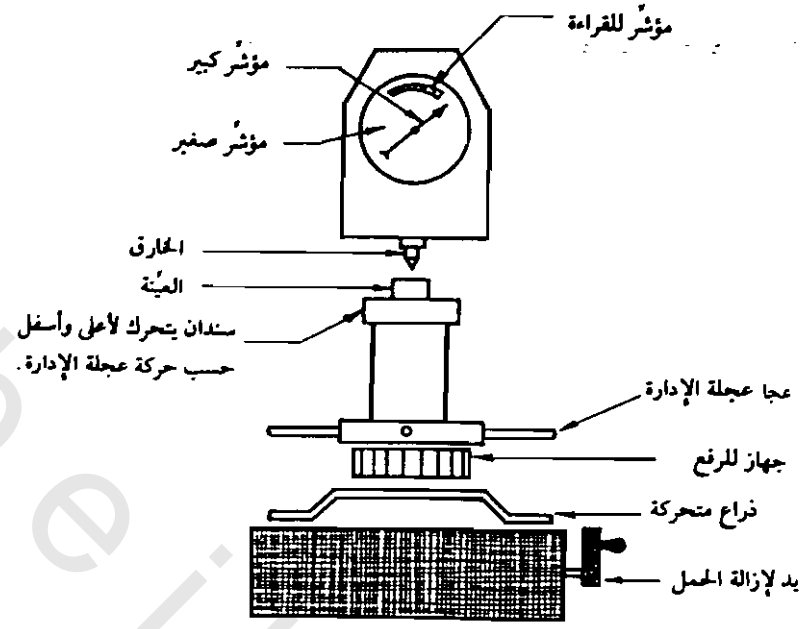


الشكل (3 - 20)

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 المبينات أقطارها 10 , 5 , 2 , 1 mm 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

فمثــلا عند إجراء اختبار صلادة الفــولاذ تكــون الحمولــة 3000kg ، والــقطر 10mm ، وتستمر فترة التحميل لمدة 15s فقط ، وبشكل عام فــإن زمن التحميل لا يجب أن يتجاوز 15-10s في حــالة السبــائك الحديدية وفي حدود 30s في حالة السبائك غير الحديديــة. وتتم قراءة الأثــر على الــسطح بــواسطة المجهر(الميكروسكوب) ، ويتم الحصول على رقم برينل للصــلادة من العلاقة التالية :

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

أو يعبرعن رقم برينل للصلادة جبرياً كما يلي :

$$BHN = \frac{P}{\pi D^2 (1 - \sqrt{1 - d^2 / D^2}} \quad \text{..... ....(18 - 3)}$$

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 المصلّد 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 .

مثـــــال (3-3)

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

الحـــل :

من علاقة الحمل وقطر الكرة المستخدمين وقطر الأثر علـــى الســـطح يمكـــن حساب رقم برينل للصلادة من المعادلة رقم (3-18) حيث أن :

الحمل = P = 300kg .

قطر الكرة = D = 10mm .

قطر الأثر = d = 3.5mm .

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

أي أن رقم برينل للصلادة لهذه المادة هو 302 .

2-3.7.3 اختبـــار فيكـــرز للصـــلادة (Vickers Hardness Test)

يستخدم مع هذا الاختبار مبين أو مخترق مصنوع من الماس قاعدته على شكل هرم ، والوجه الآخر بزاوية 136 درجـــة كمـــا موضـــح فـــي الشـــكل (3-22) ، ويقدّر رقم الصلادة في هذه الحالة بقسمة الوزن المســـتخدم علـــى مساحة أثر الهرم على السطح في المعادلة (3-19) .

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

أو جبرياً كالأتي :

$$VHN = \frac{2P\sin(\frac{\alpha}{2})}{d} \quad \text{.....(19-3)}$$

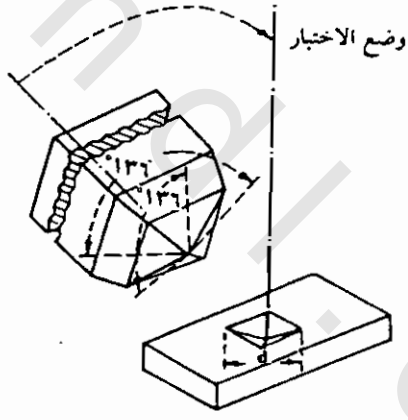
حيث أن :

VHN : رقم " فيكرز " للصلادة .

P : الحمولة المؤثرة بالكيلوجرام .

D : قطر الأثر .

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



الشكل (3-22)

الهرم الماسي المستخدم في اختبار فيكرز

ويـــمكن في هذه الحالة الحصول على رقـــم الصلادة مباشرة من الجداول وتتبع الطريقة نفسها في اختبار برينل ، والمتمثلة في وضـــع الحمـــل علـــى السطح حيث يتم التحميل بصورة ذاتية .

obeikandl.com

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 .

مثـــال (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 .

الحـــل :

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 :

obeikandl.com

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

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 .

$$\therefore\ VHN = \frac{2\ x50\ \sin\left(\frac{136}{2}\right)}{(0.725\ )} = 175$$

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 (23-3) . وتتكون ماكينة الصلادة في هذه الحالة من حمولة يمكن إنزالتها إلى سطح المادة مع مبين الصلادة وجهاز لإسناد العينة .

يتم أولا وضع حمولة صغير 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

obeikandl.com

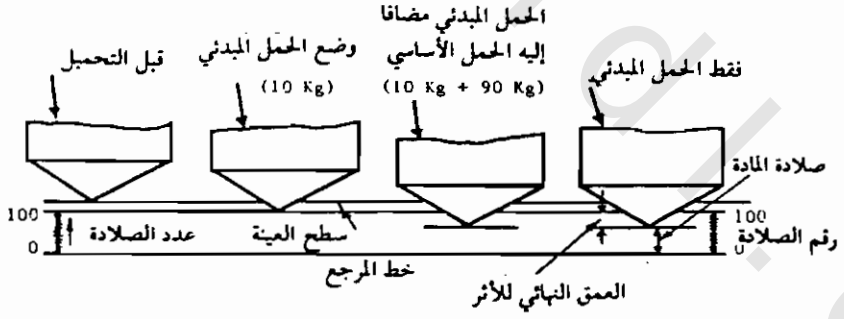
الصلادة لهذا الاختبار ، كما يمكن استخدام أوزان مختلفة وكذلك مبينات متنوعة الأقطار كما موضح في الجدول (3-3) . ويعد اختبار روكويل للصلادة الأكثر شيوعا واستعمالا لما له من ميزات عديدة منها :

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 التدريج بين الصفر إلى الـ 100 وحدة .

c) له عدة تدريجات تصل إلى 15 تدريجا يمكن استخدامها حسب صلادة المادة ، ولكن أكثرها شيوعا هما التدريجان (B) و (C) ، ويرتبط التدريج (B) بالخارق الكروي أما التدريج (C) فيرتبط بالمخروط الماسي .

d) يمكن قياس مدى واسع من الصلادة بتغيير الأوزان ونوع التدريج وكذلك مبين القراءات .



الشكل (3-23)

خطوات إجراء اختبار روكويل للصلادة

e) تقل 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 مبينات 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 معدّل 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 تبعا لذلك .

جدول (3-3) مقاييس روكويل للصلادة

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

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

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 مبين 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 .

5-3-7-3 كشاف 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 المبين 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 :

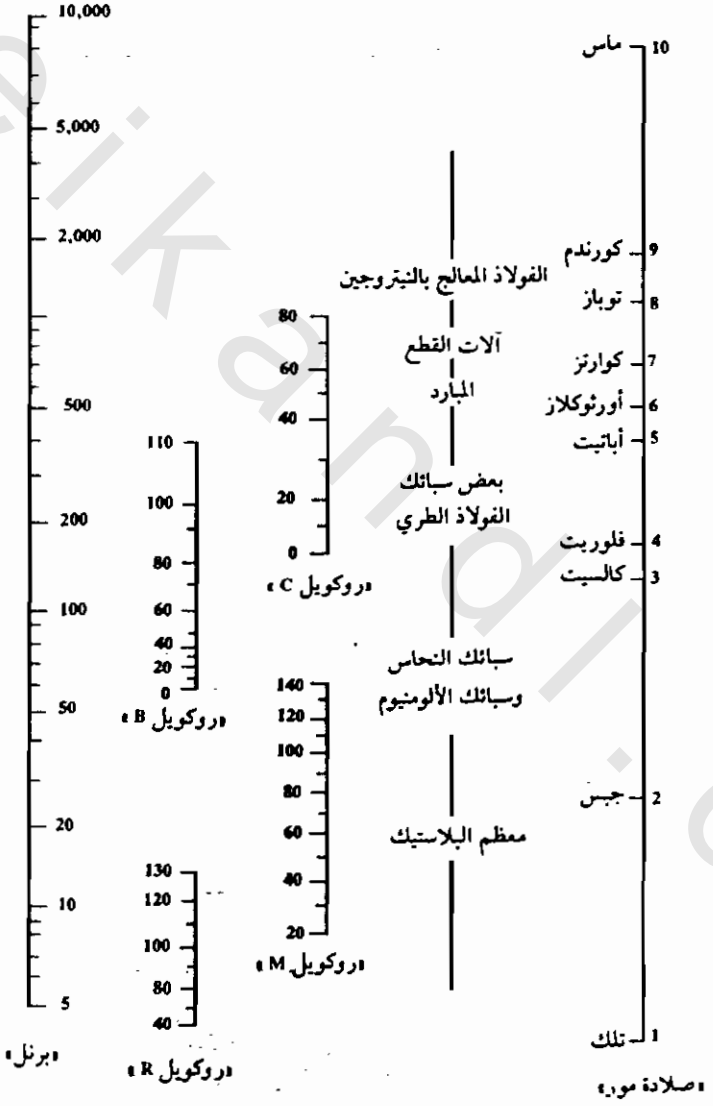
1) سهولة الحركة والنقل ويمكن استخدامه في الاختبارات المعملية أو الحقلية .

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

3) تعطى قراءة الصلادة مباشرة على قرص مدرّج 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 (3-4) : التطبيقات المتنوعة لاختبارات الصلادة المختلفة

برنل	روكويل	فيكرز	الصلادة الدقيقة
منشآت الفولاذ وأي قطاعات مدلفنة معظم المواد المصبوبة بما في ذلك الفولاذ وحديد الزهر والألمنيوم وجميع المطروقات.	الأجزاء المصنعة بصورة نهائية مثل : لقم الارتكاز والصمامات والصامولات والمسامير والدلافين والمجموعات المسننة والبكرات والمسامير اللولبية ...إلخ. أجهزة القطع مثل المنشار والسكاكين ومنشار اليد والمقصات عدد التشكيل المغلفات الصلدة الصبات وبعض المطروقات الصغيرة الأنواع الفلزية الأسلاك السميكة التوصيلات الكهربائية ألواح البلاستيك الكربيدات الأسمنتية	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.	سطح مغطى سواء كان بفلز أو باستخدام الطلاء شرائح رقيقة جدا من المواد الفلزية تصل إلى سمك 0.001 أنج. دراسة تدرج 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 الجرمانيوم والزجاج. المواد المعتمة. مسحوق الفلزات. تقدير الصلادة للأوجه المختلفة في الفلز كل على حدة.

6-3.7.3 العوامل المؤثرة على دقّة قياس الصلادة

تتأثر دقة الأثر (الحز) الذي يُترك على سطح المـــادة المختبـــرة بأحـــد اختبارات الصلادة بالعوامل التالية :

1- دقة الحمل المستخدم .

2- معدّل وضع الحمل على الســـطح ، ولتـــلافي أي اختلاف في ذلك فهنـــاك عامل تحكم أتوماتيكي ينظم معدل تقديم الحمل إلى السطح و إزالته بعيدا عـــن السطح .

3- الزمن الذي يسمح فيه ببقاء الحمل على سطح المادة وفي معظم التجـــارب وقد حدد بثلاثين ثانية يتم بعدها إزالة الحمل بصورة تلقائية .

4- حالة المؤثر المستخدم وظروفه,ولـــذا يجـــب المحافظـــة علـــى الخـــادش الخارق (Indenter) ، والتأكد من عدم تعرضه للتلف وأن زوايا الهـــرم مـــا 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 حيـــث لا بد أن تكون العينة ذات ســـمك محـــدد وتختـــلف طريقة القياس على حساب السمك .

8- طريقة تجهيز سطح العينة حيـــث يجب أن يكون السطح نظيفا ومصـــقولا ثم تجرى عملية نمش بعد ذلك .

9 - شكل العينة حيث يفضل عدم قياس الصلادة عند الأطراف .

10- موضع الأثـــر على السطح حيـــث يجب التأكد من أن الخارق موضـــوع في موقع لم يسبق له التأثير عليه .

11- انتظام المادة من حيث التركيب الداخلي حيث تختلف الصـــلادة حســـب 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 الشّد 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 فعليّا لحمولات ديناميكية (صدمات) ، 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$^{\frac{1}{2}}$ 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 :

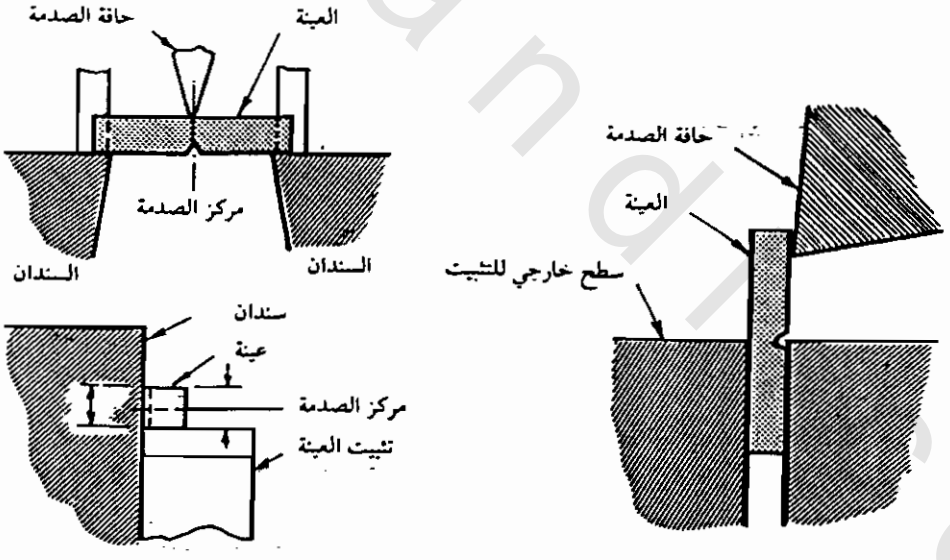
a) مقـدار طاقـة الصـدمة هي(120 قدم - باوند) لاختبـار أيزود و(210 قدم - باوند) لاختبار شاربي .

b) طريقـة تثبيت العينـة حيث تثبـت العينـة كما موضح في شكـل (3-25) ، ويكون التثبيت رأسيا" لاختبار أيزود وأفقيا" لاختبار شاربي .

c) أبعاد العينات القياسية تختلف أبعاد العينة في كلا الاختبـارين ، وأطـوال العينات المستخدمة في كلا الاختبارين موضحة في الشكل(3-26) .

d) أسـلوب إحداث الصدمة على العينة حيـث تتم الصدمة في اختبار أيزود في منطقة الثلم بينما تكون الصدمة في اختبار شاربي في الإتجاه المضاد للثلم.

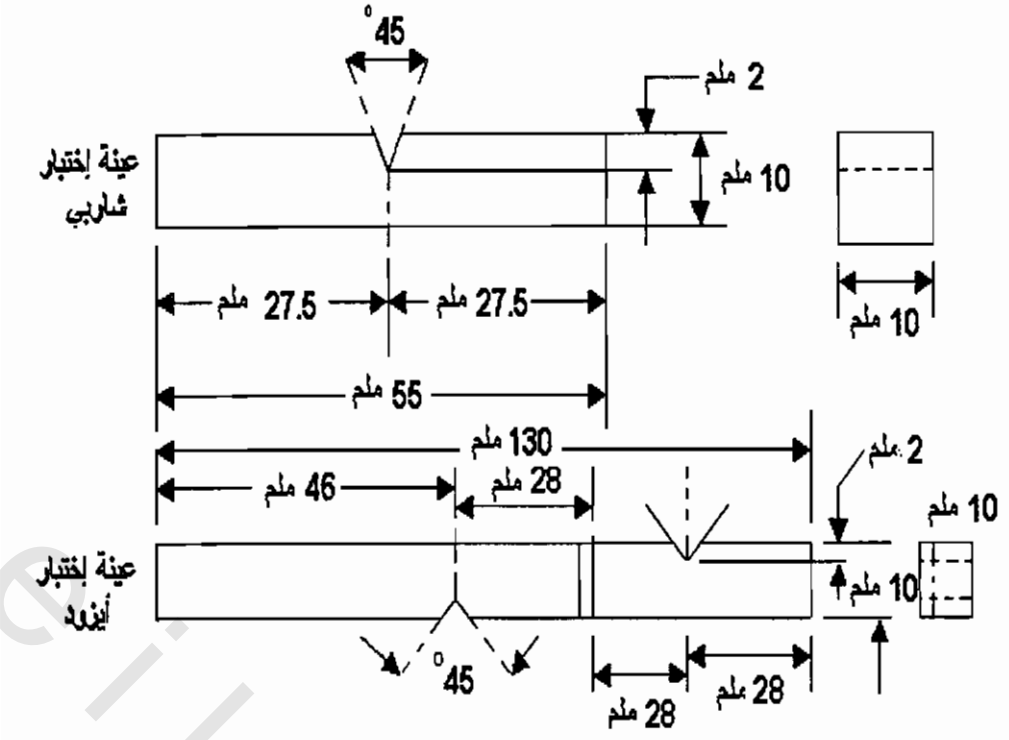
e) تستخدم طريقة أيزود في إختبار العينات عند درجات الحرارة العادية بينما يمكن إجراء اختبار شاربي عند درجات حرارة منخفضة(مثلا يتم تبريد العينة في النتروجين المسال) . وتستخدم هذه الطريقة بوجه خـاص نظـرا" لأنهـا سريعة ولا يستغرق تثبيت العينة فيها وقتا" طويلا" .



a) b)

الشكـل (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 إختبار الصلابة

تجرى معظم اختبارات الصدمات على عينات مثلّمة 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 قصيفة وبالتالي يمكن دراسة خاصية المتانة من خلال إختبار الصدمات ومن أهم العوامل المؤثرة على نتائج إختبار 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 .

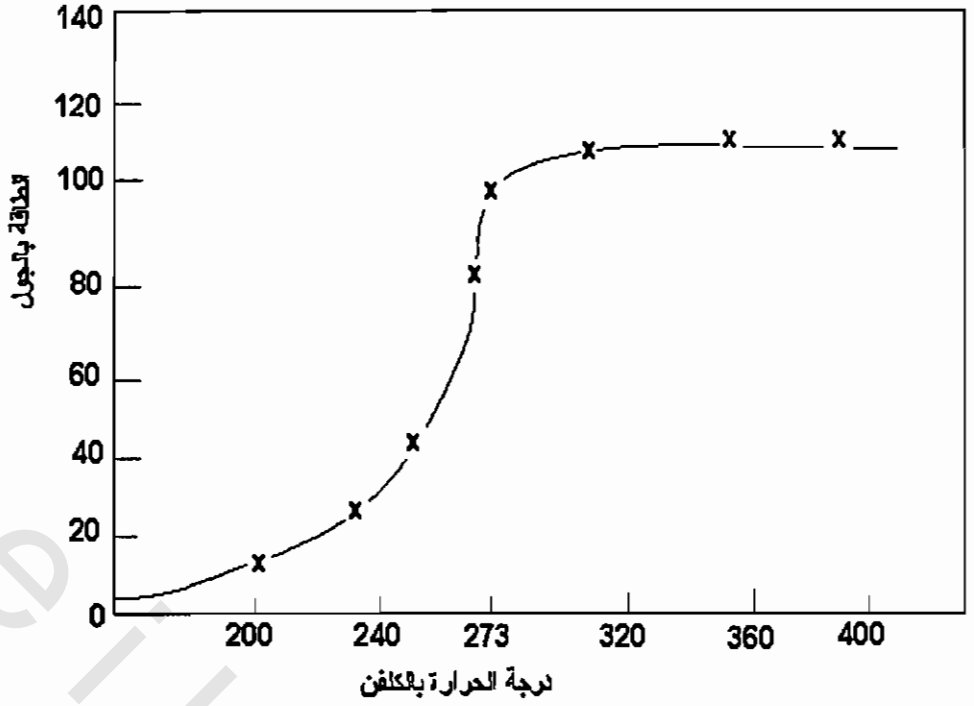
3- درجة حرارة العينة أن لدرجة الحرارة تـأثير كبير على مقدار المتـــانة وقد وجد أن انخفاض درجة الحرارة يقلل كثيرا من المتانة النسبية لهذه العينـــة كما هو واضح في الشكل(3-27) للفولاذ الطري .

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 لأغـــراض أو تطبيقات معينة ، وعلى الرغم من ذلك فإن إختبار شاربي يـــمكن أن يعطـــي فكرة مبدئية عن تصرفات الفولاذ عند درجات حرارة بين - 40 إلـــى + 500 درجة مئوية . وطبقاً للمواصفات القياسية الأمريكية ، عند تقديم تقريـــر عـــن 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 تنكسر عند قيمة المتانة الفعلية .

obeikandl.com



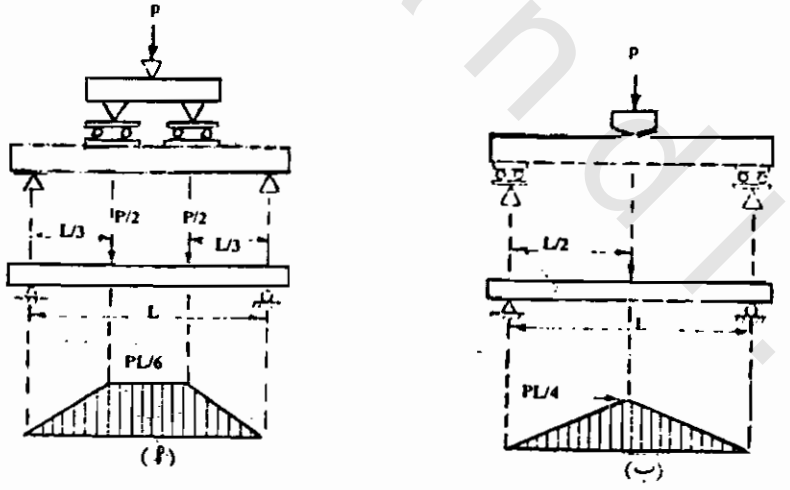
الشكل (3-27) تأثير درجة الحرارة على طاقة الصدمة للفولاذ الطري

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 والهياكل الفلزية لعمليات ثني ، أي أن هناك أجزاء كثيرة من المنشآت والمعدات التي تتعرض جهة منها لإجهادات الشّد بينما تكون الجهة الأخرى معرّضة 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 إختبار 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 استعمالا المبين في الشكل (3-28) وفيها يكون الحمل في المنتصف أو موزعا" على ثلث المسافة. وفي كلا الحالتين ، يكون توزيع الأجهادات الناتجة مختلفاً كما هو واضح في الشكل(3-28) . وينتج عن الحمل المؤثر إجهادات إنضغاط في الجزء العلوي وإجهادات شّد في الجزء السفلي . ويختلف أقصى إجهاد انحناء للمادة تبعاً لنوع المقطع ، ولقد وضعت العلاقتان التاليتان للحصول على قيمة الأجهادات تبعاً لنوع المقطع :



الشكل (3-28)

توزيع عزوم الانحناء في القضيب المعرّض 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)

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

(ب) عينة دائرية المقطع :

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

أو $\sigma = \frac{32M}{d^3}$ .....(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 الشّد ويكون الانهيار في شكله العام شبيها بانهيار المادة تحت تأثير أحمال الشّد .

obeikandl.com

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

c) انهيار القص يحدث الانهيار أساسا عند نقطة التحميل نظرا لتركيز الحمل عند هذه النقطة .

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

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 .

obeikandl.com

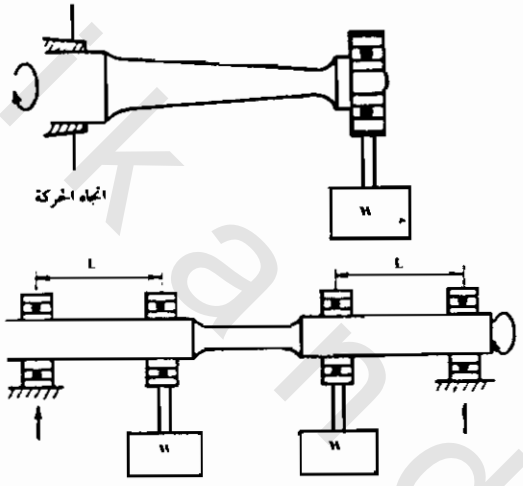
6.7.3 اختبار الكـــلال (Fatigue Test)

يسبب الكلال أكثر من 80 إلى 90 % من انهيار الأجزاء المتحركة عنـد سرعات عـالية والعاملة في الماكينات والأجهزة ، ويرجع انهيار هذه الأجزاء إلى تعرضها إلى الأحمال المتكررة أي إلى تكرار التعـرض للإجهـادات . تهدف إختبارات الكلال إلى توفير بيانات والحصول على معلومات كافية عـن تصرف المواد تحت الأجهادات المتكررة بشكل متقطع أو دوري . وتسـتخدم المعلومات المحصل عليها من اختبار الكلال على وجه خـاص في مسائـل التصميـم للأجزاء المختلفة من الماكينات والإنشـاءات . ويسـتخدم هـذا الاختبار بشكـل رئيسي في دراسـة تصرفات أجزاء الماكينات مثـل عمـود الإنارة والمسامير والصمامات والزنبرك المعلق ، وأجزاء من الطائرات النفاثة وقضبان السكك الحديدية والقاطرات وأجزاء الجسور وغيرها .

وهناك حد أقصى للإجهاد الذي يمكن أن تعمـل عنـده المـواد لفتـرات طويلة " إلى أجل مسمّى " دون انهيارها ويعرف هـذا الـقدر من الأجهـادات باسم حد الإطاقة أو حد الإكلال . وتكون الأجهادات المتكررة التي تتعـرض لها المادة إما أحادية النوع أو خليط من الأجهادات ، الانحنـاء (bending) ، الالتواء(twist) أو المحورية (axial) . وتختلف الماكينة المستخدمة للإختبار تبعا لنوع التحميل وتتكون معظم ماكينات إختبار الكلال من:

1. جزء خاص بـأسلوب التحميل حيث يمكن أن يكون الثـقل سـاكناً ، أو يمكن تعديله لتثبيت الحمل المستخدم ، وغالبا مـا يـتم حسـاب الأجهـادات المستخدمة أو قراءتها من الانفعال الحادث للمادة .
2. عدة تدريجات لقياس الأحمال والقوى المؤثرة .
3. عدّادات إلكترونية للتحكم في سرعة التحميل ونوعها وكذلك قراءة النتائج .

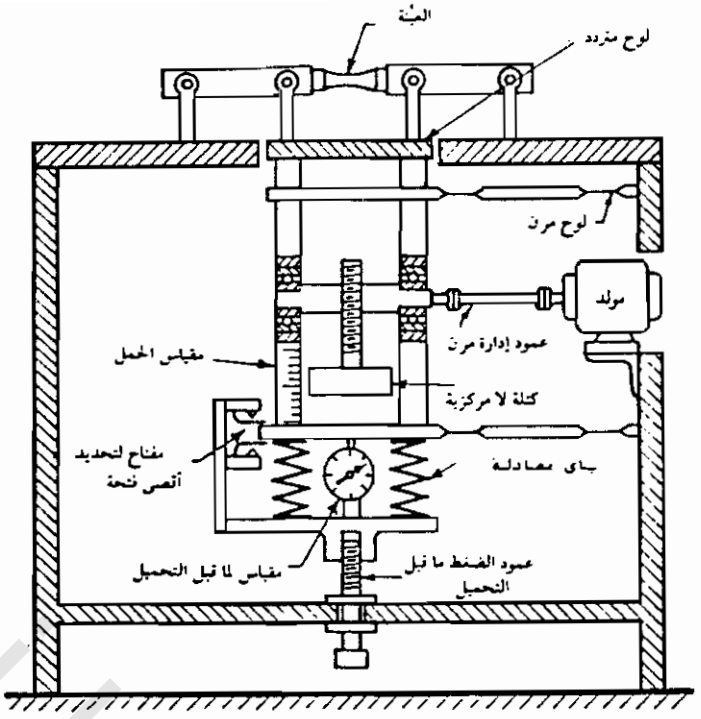
توجد ماكينات بسيطة وسهلة العمل تستخدم في المعامل كما موضح في الشكل رقم (3-29) ، وهي عبارة عن عمود إدارة يحرك العينة مغيرا وضعها بين إجهادات الشد وإجهادات الإنضغاط ، ويعيب هذه الماكينة تركيز الأجهادات القصوى على جزء قصير من العينة بالقرب من نقطة الاتصال ، وهناك نوع آخر يسمّى الماكينات المركبة وهذا النوع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



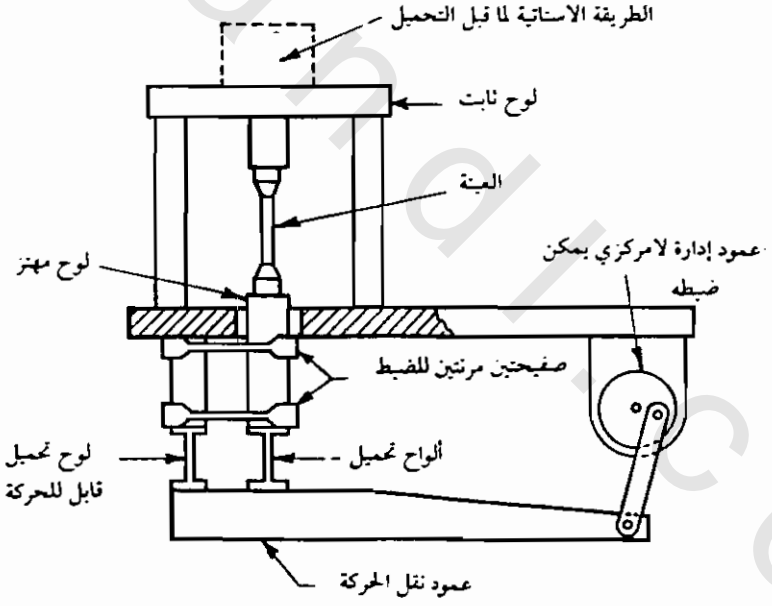
الشكل (3 - 29)

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) ماكنة اختبار الكلل من نوع الثني ثابتة الأجهاد



b) ماكينة اختبار الإجهاد ثابتة التردد

الشكل (3-30)

جدول (3 - 5)

تأثير طريقة تجهيز السطح على حد الكلال

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

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 .

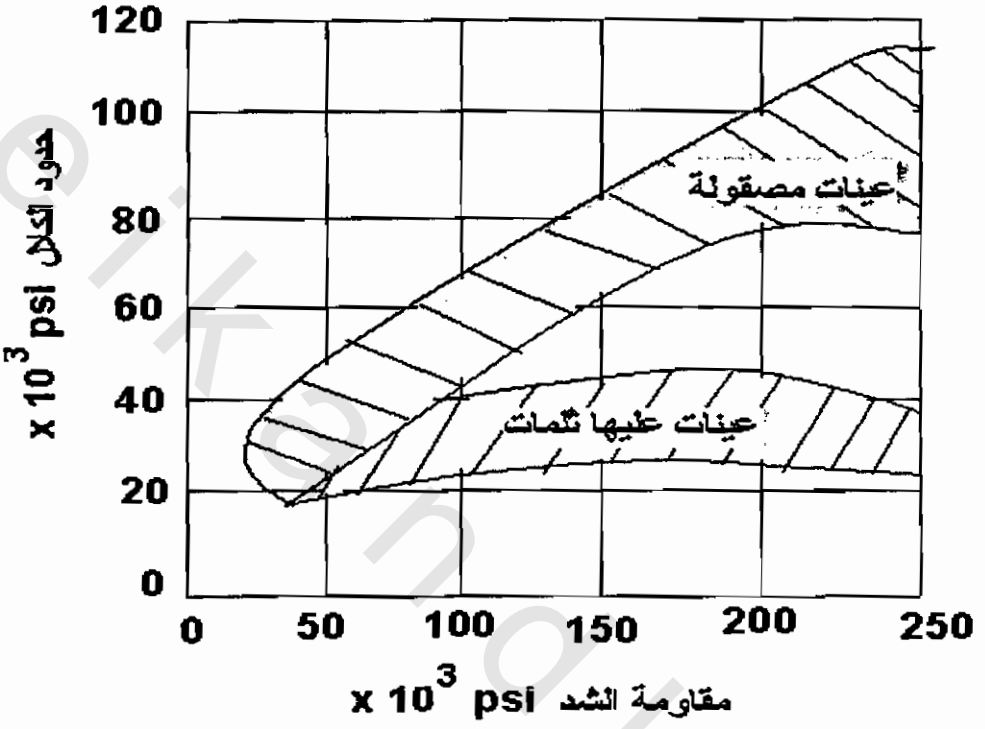
5- مقدار الإجهاد المؤثر على المادة ، فإذا زاد الإجهاد المؤثر قل عدد الدورات التي تنكسر عندها المادة .

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 بيانيا 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 " 10×10^6 " دورة يعد عمرا لا نهائيا ، ويعتبر هو حد الكـــلال(حد الإطاقة) . وإجهاد التصميم في إختبار الكلال يقل كثيرا عن الأجهادات التي يسح بها إختبار الشّد ، فقد تصل حدود الإطاقة في الكـــلال إلى 50% من إجهاد الشّد ، ويظهر لكثير من المواد مثل الحديد ، والفولاذ

الطري ، وسبائك الألمنيـــوم وسبائك التيتانيـــوم والمغنيسيـــوم حدود إطاقة بينما هناك مواد أخرى كثيرة تفشل في إظهار حد الإطاقة 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 كبيـــر من العينات والتقديرات الإحصائية فلا يكتفي بعينة أو عينتين ولكن تصل أعـــداد العينات المختبرة في بعض الأحيان إلى عشر عينات للإختبار الواحد .
3. تعد النتائـــج التي يـــتم الحصول عليها في غاية الأهمية في عمليات التصميم وذلك نظرا لأن إنهيار الكلال يكون فجائيا وبدون سابق إنذار ، ولذا يجب تجنبه بأي صورة . وحد الإطاقة في الـــغالب أكثر أهمية من نقطة الخضوع ، وخاصة للأجزاء المعرضة للإجهادات الترددية حيـــث إن التحميل الترددي والدوري له تأثير كبير على نقص الإجهاد المسموح به والذي يمكن أن تتحمله المادة .
4. لا يـــدخل في إختبار الكلال المواد السيراميكية نظرا لضعفها الشـــديد ولـــكن البلاستيك من المواد التي درست ويقاس لها حدود الإطاقة باختبار الكلال .

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

1. تجهيز السطح بصورة جيـــدة جـــدا ومحاولة إزالـــة أي خـــشونة 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 تركز الأجهادات في نقطة أو مساحة ، وذلك من خلال زيادة أقــطار الانحناءات والأركــان ، 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 .

مثــال (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 0.53% كربون			سبيكة فولاذ (كروم - نيكل)			فولاذ كربوني بارد فحـــــاة		
عـــدد الدورات	الإجهـــاد		عـــدد الدورات	الإجهـــاد		عـــدد الدورات	الإجهـــاد		عـــدد الدورات	الإجهـــاد	
$N\times10^7$	$Psi\times10^3$	MPa	$N\times10^7$	$Psi\times10^3$	MPa	$N\times10^7$	$Psi\times10^3$	MPa	$N\times10^7$	$Psi\times10^3$	MPa
0.003	45	315	0.02	58	406	0.004	95	665	0.004	100	700
0.006	43	301	0.03	57	399	0.006	86	602	0.008	97	579
0.02	35	245	0.04	56	392	0.02	75	525	0.015	95	665
0.1	30	210	0.08	55	385	0.03	73	511	0.03	90	630
0.15	29	203	0.1	54	378	0.1	67	469	1	90	630
0.5	28	196	0.2	53	371	1	66	462	10	90	630
1	28	196	1	53	371	5	65	455	10	90	630
00	28	196	5	53	371	10	65	455			
			00	53	371	00	65	455			

الحـــل :

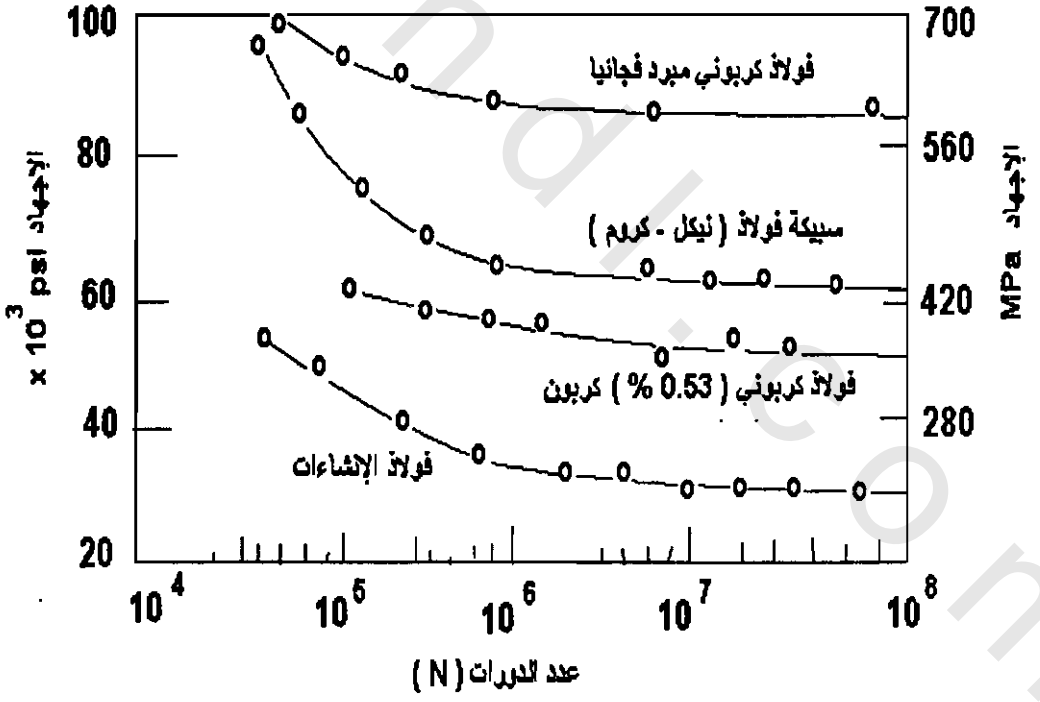
a) علاقة الإجهاد – عدد الدورات موضحة في الشكل (3-32) .

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

الجـــدول (3-7)

حد الكلال لعدد من أنواع الفولاذ

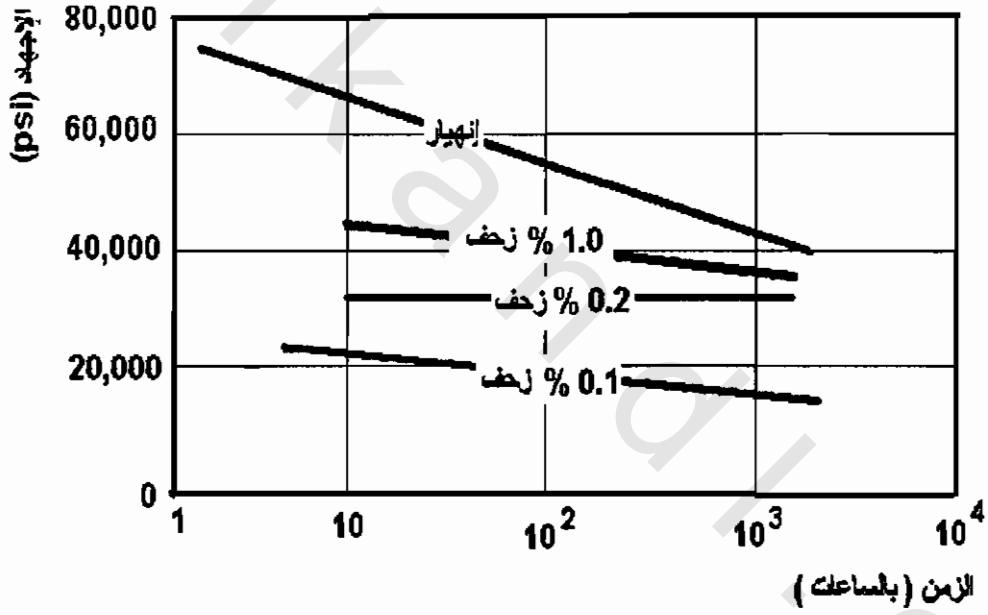
المادة	حد الإطاقة	
	باوند / أنج مربع	ميجاباسكال
فولاذ كربوني مبرد فجائيا	90,000	630
سبيكة فـــولاذ (نيكـــل – كروم)	65,000	455
فولاذ كربوني (0.53%) كربون	53,000	371
فولاذ الإنشاءات	28,000	196



الشكل (3 - 32) : العلاقة بين عدد الدورات والإجهاد في إختبارات الكلال للمثال (3-5)

7.7.3 اختبـــار الزحـــف (Creep Test)

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

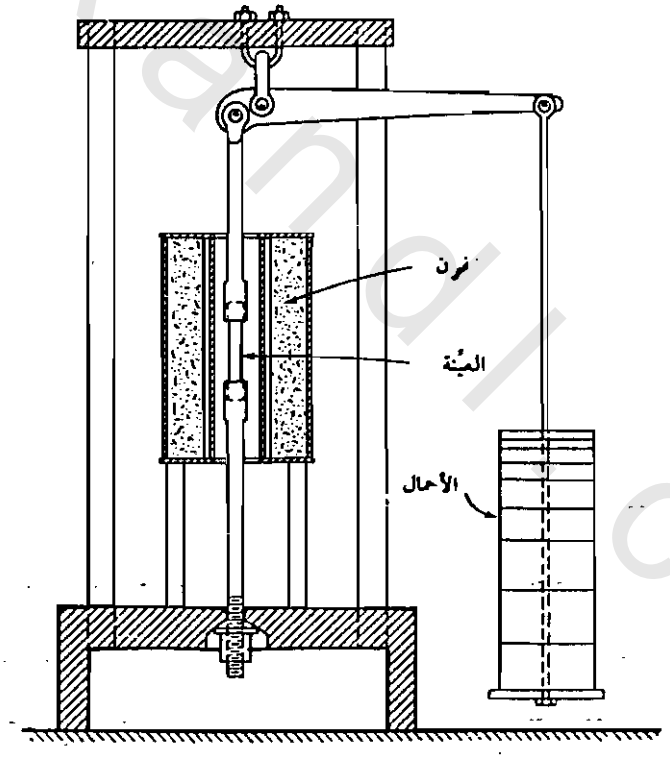


الشكل (3-33) منحنيات الزحف لسبيكة الفولاذ " N-155 " منخفض الكربون بعد الطرق عند درجة حرارة 650c°

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 هـــذا الأساس تـــتم الاستطالة الصغيـــرة الحادثة من تأثير عاملين هما درجة الحرارة والحمل ويعرّف بـــاسم الزحف .

لقد تـــم الاهتمام بهذه الخاصية وتطوير السبائك الـــمناسبة لمقاومة الزحف بعد تزايـــد الحاجة إلى مواد تعمل عند درجات الحرارة العالية كما في محطات الـــقوى " محطات البخار "والصنـــاعات الكيميـــائية " الغلايات " ، ولقد زادت الحاجة إلى تطوير سبائـــك 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 عـــناصر الوقود . ويبين كـــل ذلك أهمية إختبار المواد والحصول على معلومات عن مقاومتها للزحف قبل الاستخدام .

تقوم اختبارات الزحف على أســـاس إختبار تصرفات المادة تحت تأثير درجات الحرارة العالية تحت ظروف إجهادات الاستعمال الثـــابتة . ويستخدم لهذا الاختبار 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 وتصرفـــات المواد تحت ظروف الزحف وكذلك المعلومات المحصل عليها وكيفية تفسيرها فيما يلي :

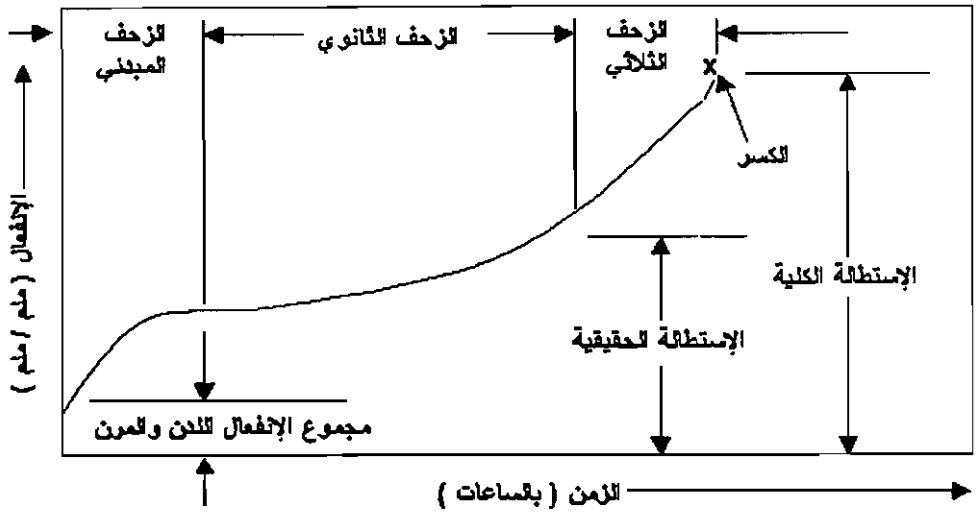
1- لابـــد من إجراء الاختبار لفترة طويلة وعدم الاعتماد على نتائج الاختبارات لفترات زمنية قصيرة مع محاولـــة مد المنحنى خـــارجا للحصول على معلومات لأزمنة أطول ، لأن ذلك لا يمثل طبيعة تصرف المادة ولا يعبر عن القيم الحقيقية لمقاومة المادة للزحف .

2- في أمور التصميم ، لابد من الاعتماد على نتائج تجارب الفترة الزمنية الطويلة ، وعدم الأخذ بـــالنظر اختبارات الأزمنة الـــقصيرة ، حيـــث أن هناك تغيرات داخلية تحدث في المـــادة مع الزمن ولا يـــمكن التنبؤ بهـــا من المنحنيات . ولكن في حالة استخدام الاختبار لتطوير السبائك فيمكن عندئذ الاعتماد على الاختبارات قصيرة الزمن .

3- يـــتم في إختبارات الزحف تحميل الشد في اتجاه محوري في الفرن ، ولا بد أن تكون درجـــات الحرارة مضبـــوطة بدقة كبيـــرة . كما يجب أن تكون أجهزة قراءة الاستطالة على أعلى درجة من الحساسية وفي حدود 1×10^{-8} 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 الـــزحف للمواد الفلزية كما مبين في الشكل(3-35) من ثلاث مناطق أساسية :



الشكل(3-35): المناطق الرئيسية الثلاث في منحني 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 للانهيار .

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 الـــزحف 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 الإفاقة ، 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) سبائـــك كـــل 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 والمولبيديوم والتنجستن .

وفيما يلي مثال لتوضيح طريقة حساب معدل الزحف .

مثـــال (3- 6)

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

$$\varepsilon_s = C\sigma^n \exp(-\frac{Q}{RT}).....(22-3)$$

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°c) ، بينما يكون المعدل مساويا (0.005%) للســـاعة ، عندما تكون درجة الحرارة (700°c) وذلك عند الإجهاد نفسه والمطلوب إيجاد ما يلي :

a) حساب طاقـــة التنشـــيط للزحـــف فـــي مـــدى درجـــات حـــرارة مـــن (700 - 800° c) .

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

obeikandl.com

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 .

الحـــل :

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

$$\ln \varepsilon_s = \ln C \sigma^n - \frac{Q}{RT} \quad \text{.....(23-3)}$$

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

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

$$\ln 5.5x10^{-4} = \ln C \sigma^n - \frac{Q}{(973)R} \text{.....(25-3)}$$

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

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

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 :

$$0.01 = C\sigma^{n}\exp\left[\frac{-259.93}{(8.1x1073)}\right]$$

$$\therefore C\sigma^{n} = 4.573x10^{10}$$

$$\therefore \varepsilon_{500+273} = 4.573x10^{10}\exp\left[\frac{-259.93}{(8.1x973)}\right] = 1.22x10^{-7}\ h^{-1}$$

أي أن معدل الزحف يكون مساويا للمقدار 1.22×10^{-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°c تطبق العلاقة(3-22) عند درجتي الحرارة المذكورتين ، لنحصل على المعادلتين(3-26) و(3-27) كما يلي :

$$\sigma_{s(1093)} = C\sigma_1^4(3.73x10^{-13}).....(26-3)$$

$$\sigma_{s(1073)} = C\sigma_2^4\exp^{\left(\frac{-259.93x10^3}{8.1x1073}\right)} = C\sigma_2^4(2.186x10^{-13}).....(27-3)$$

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

$$C\sigma_1^4(3.73x10^{-13}) = C\sigma_2^4(2.681x10^{-13})$$

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

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

8.3 التصلّد الانفعالي (Strain Hardening)

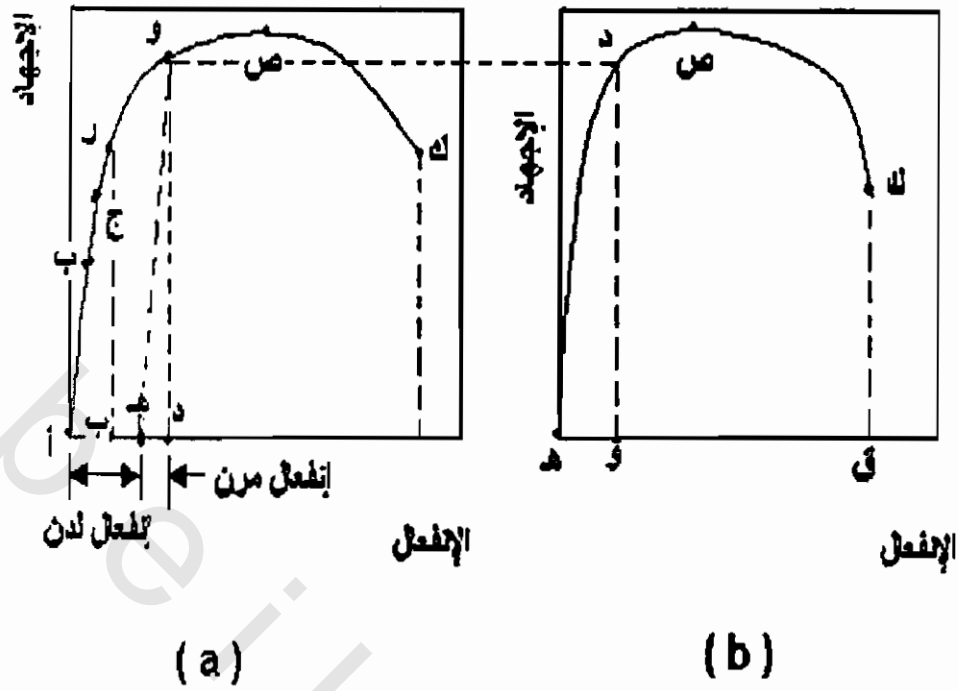
يمثل الشكل(3-36) منحنى الإجهاد – والانفعال لأحدى المواد . فإذا حملت عينة من هذه المادة في النقطة(ج) فإن العينة تسلك المسار (أ ب ج) وإذا أزيلة الحمولة بعد ذلك ، فإن العينة ستعود لشكلها الأصلي متخذة نفس المسار السابق وهو المسار (ج ب أ) وذلك لأن التحميل كان أقل من حد المرونة للمادة .

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(3-36.a) ، وإذا أزيلة هذة الحمولة ورفعت هذه العينة من آلة إختبار الشد وأعطيت لأحد الفنيين بالمعمل لإجراء إختبار شد عليها مرة أخرى لنتج المنحنى المبين في الشكل (3-36.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 ، أتبعت 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 دائمي ، فعند إزالة الإجهاد بقي الانفعال

اللدن (أ هـ) ولم يختلف إلاّ الانفعال المرن (وهـ) فقط ، والـناتج 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 إلاّ انفعال مرن قدره (و هـ) وهو أكـبر من الانفعال المرن في الشكل(a) والبالغة قيمته (أ س) والناتج 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 مقـاومة الخضوع ، أي يـؤدي إلى تصلد المادة . لـذلك يـطلق على هذه الظاهرة بظاهرة " التصلد الانفعالي " أو التصلد بالتشكيل (Work Hardening) ، أو التشكل على الـبارد (Cold Work) ، وتعرف بأنها الـزيادة 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 أيـضا 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 (3-36)

كيفية حصول التصلد الانفعالي في المادة

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

9.3 شكـــل الكســـر

يتخذ الكسر أشكالا مختلفة تبعا لنوع المادة المختبرة . يبدأ الكسر في المواد المطيلة كالصلب منخفض الكربون عـــند منتصف العينة ، ويمتـــد الـــكسر جانبيا في اتجاه عمودي على محور العينة مكونا سطحا مستويا خشنا يتغير بعده اتجاه الكسر النهـــائي ليميـــل بزاوية 45° تقريبا على محور العينة محدثا الكسر النهائي للعينة ويطلق على شكل الكسر هذا بكسر القدح والمخروط (Cup and Cone) .

obeikandl.com

10.3 فحص المـــواد (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 الكلالي .

b) إجهادات وحدوث الكسر .

c) خدوش الزحف .

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

1) أثناء عملية التشغيل بالماكينات والتشكيل ، ويهدف هذا الفحص في هذه المراحل إلى ملاحظة الأبعاد والتـأكد 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 المشكلة .

2) عند استلام الـمادة لاستخدامها في الغرض المطلوب ، ويهدف الفحص في هذه الحالات إلى التـأكد من مطابقة الـمادة للمواصفـات المطلوبة من حيـث نوعها وتكوينها وتركيبها وكذلك دقة أبعادها ، كما يهدف الفحص في هذه الأثناء إلى التأكد من خلو المادة من أية عيوب أو تصدعات سواء كـانت على السطح الخارجي أم داخل المادة .

3) الكشف الدوري والصيـانة ، 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 مشاكـل قد تكون سببا لانهيار الـمادة ، وبهذا يمكن تلافي وقوع كـارثة كبيرة ومن أمثـلة ذلك الكشف الدوري على الطائرات سواء المحركات أو جسم الطائرة نفسها ، وكذلك معدات محطات تحلية الميـاه أو مصافي البترول وغيرها .

4) بعد انهيار المادة أو إخفاقها يـتم عندئـذ فحص أجـزاء صغيرة من الـمادة المكسورة ويـركز بوجه خـاص على التي حدث فيها الانهيار . ويمكن من هـذا 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 . وتقسم إختبارات الفحص إلى نوعين رئيسيين ، إختبارات متلفة حيـث يحتاج الاختبار في هذه الحالة إلى قطع أجزاء (عينات) من المادة لإجراء الفحص عليها ، أو إجراء بعض الاختبارات على المادة

بكاملها حتى يـتم 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 مثلا تقنية الأشعة السينية والاستعاضة بها عـن الطرق التقليدية وعندئذٍ لا يـلزم قطع أو تشويـه المادة . أما الاختبارات الأخرى والأسـاسية في هذا المجال فمنها فحص السطوح والـتركيب والتـكوين الداخلي وشكل السطح الخارجي للمادة والتعرف إلى المادة أو أية عيوب فيها ، ومن أهم تلك الفحوصات :

1.10.3 **الفحص الضـوئي** (Photo Examination)

يمكن عن طريق الميكروسكوب الضوئـي تحديد حجم الحبيبة وشكلها وكذلك اتجاهات الحبيبات وكيفيـة توزيعها ، كما يمكن الكـشف عن طور المادة الفلزية أو الأطوار المختلفة المكونة لسبيكة معينة ، وإضافة إلى ذلك يمكن التعرف على نوع الـمعالجة الحرارية التي مرت بها المادة ، ويـمكن كذلك التعرف على نوع إنهيار المادة . وبهذا يمكن التـوصل إلى أسبـاب هذا الانهيار سواء كان ناتجا من وجود عيوب في المادة نفسها أم في ظروف العمل أو الجو المحيط بها . ويوجد نوعان من الفحص المجهري للمادة هما :

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

b) الفحص الميكروسكوبي (Microscopic Examination) يـتم في هـذه 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 الفحـص 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 للمـادة أو فحص سـطوح 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 حـالة فلز الأنتيمون في سبيكة لـقمة الإرتكاز أو الرصاص في سبائـك البرونز وكذلك الفوسفور في سبائك الفولاذ .
2- تحديد مدى احتواء المادة على مواد ضمنية (inclusions) غير معدنية مثـل 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 مالئة 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 بتبليل 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 .

يود	10g
يوديد البوتاسيوم	20g
ماء	$100cm^3$

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 :

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

3- النمش العميق للفولاذ : يستخدم فيه المحلول التالي :

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

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

4 - توضيـــح خطوط التشكيل في الفولاذ وفي هذا الاختبار يتم بيان المنطقة التي تعرضت للانفعال بعد منطقة المرونة ومحلول 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° c .

5- إظهار التركيـــب في الـــفولاذ المتفرع (Dendritic Steel) باستخدام محلول 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- للفـــــولاذ المقـــــاوم للصـــــدأ (Stainless Steel) والفـــــــولاذ الأوستينتي (Austenitic Steel) .

يستعمل للنمش المحلول التالي :

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

7- الألمنيـــوم وسبائكه وتتكون أهم محالـــيل نـــمش الألمنيوم وسبائكه من المواد التالية :

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

ويمكن إزالـــة الطبقة السوداء المتكونة عـــلى السطح بـــالنمش السريع في حمض النتريك المخفف.

8- النحاس والنحاس الأصفر والبرونز يتكون محلول نمشها من :

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

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 .

obeikandl.com

c) فحص التصدعات

من العـــوامل المهمة التي يجب أن تـــؤخذ بنظر الاعتبار عنـــد إجراء الفحص الماكروسكوبي هي العوامل التالية :

1- دراســـة ظروف استخدام المادة من حيـــث درجة الحـــرارة 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 وتصدعها ، سواء كان الكيميائي أو توزيع الأوجه داخل المادة وبالتالي الخواص الناتجة عنها كالصلادة ومقاومة التآكل والصدمات والأكسدة وثبات الأبعاد ، ويمكن أن يكون التركيب الكيميائي الخاطئ نتيجة اختيار خاطئ للمادة الـــمناسبة 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 التشكيـــل بعض العيوب التي تساعد على إنهيار المادة وفشلها ، مثل نتوءات واضحة أو إجهادات موضعية أثناء خرم الثقوب .

4 - الكلال ، وهو من أكثر أنواع 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 البيني ، هذا يعود لوجود الشوائب الهشة على جدران الحبيبات كما في حالة كبريتيد الحديد(FeS) في الفولاذ أو وجود البزموث(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 جزئيات 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- 9-1-2 **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 :

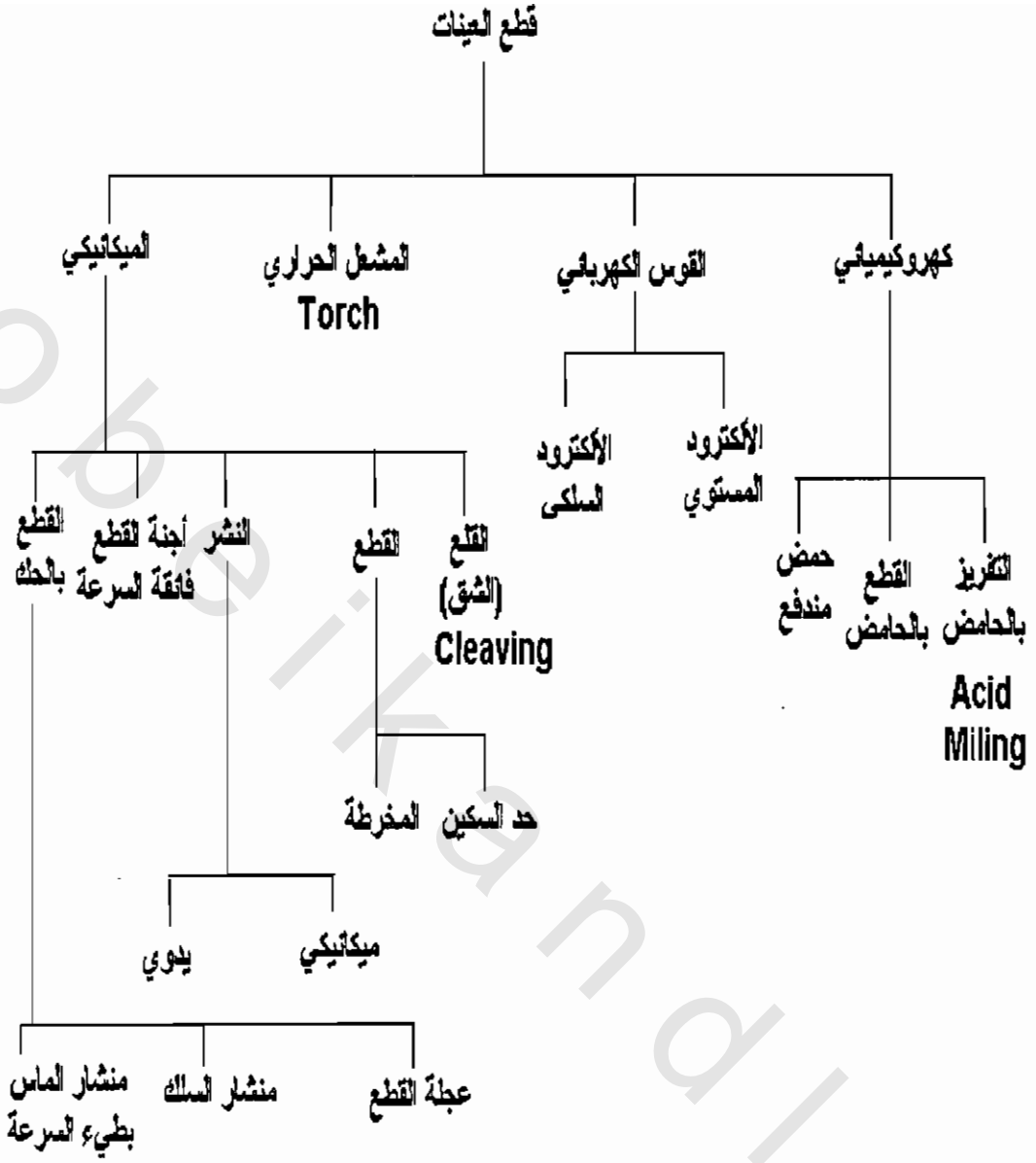
1) اختيار العينة اللازمة للفحص وقطعها (Selection and Cutting) .
2) تثبيت العينة (Mounting) .
3) ترقيم العينة وتحديدها (Marking) .
4) الشحذ والتجليخ (Grinding) والصقل (Polishing) .

5) التنظيف (Cleaning) .
6) النمش (Etching) .

ويمكن إجراء هذه الخطوات بطرق مختلفة اعتمادا 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 تغير 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 الشحذ أو الصقل .
c) التلوث من الأحماض أو مواد النمش والإظهار .

عند اختيار العينة أو القطـــاع من المواد المطـــلوب 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 الشحذ والصقل مبـــاشرة 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 عالميا .



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

obeikandl.com

11.3 تمـــارين

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 الـــواجب 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 كـــان معـــامل 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 .

obeikandi.com

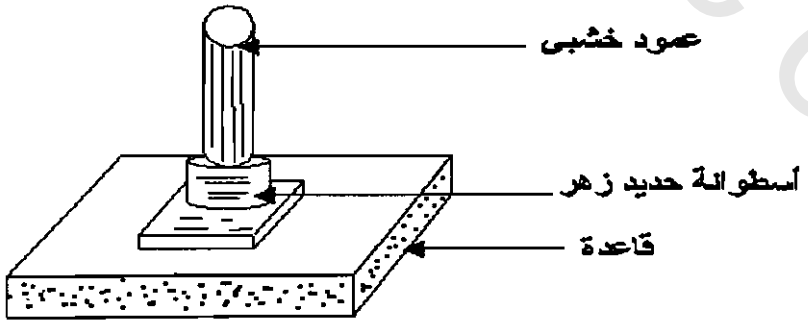
الحمل(KN)	20	40	50	60	65	70	80	80	76
الاستطالة(mm)	0.1	0.2	0.25	0.3	0.36	0.51	1.26	2.48	2.35 حدوث الكسر

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° c هو 20Mpa . ما هي قيمة الإجهاد في السلك إذا انخفضت درجة الحرارة فجأة إلى 19° c ، علما أن معامل التمدد الطولي لهذا السلك يساوي $11,7° c^{-1} \times 10^{-6}$ ، ومعامل المرونة هو 205,000MPa .

س12- عمود إنـــارة من الخشب قطره 20cm مثبت كما موضح في الشـــكل أدناه في أســـطوانة من حديد الزهر قاعدتها مربعـــة أبعادهـــا $30 \times 30 cm^2$ والأســـطوانة موضـــوعة علـــى قـــاعدة خرســـانية مربعـــة أبعادهـــا $100 \times 100 cm^2$. أحسب أقصى حمل ضغط يمكن تسليـــطه محوريا عـــلى العمود الخشبـــي ، وكذلك مقاومة ضغط التربة حتى تتحمل هذا الحمل علمـــا بأن مقاومة الضغط لكل من الخشب والخرسانة هي 100 kg/cm , 45 علـــى التوالي .



الشكل (3-38) : 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 800c° لصلب غير قابل للصدأ . فإذا علمت أن العلاقة بين انفعال الزحف و الإجهاد تتبع المعادلة $\varepsilon_c = m\,\sigma^{n}$ ، حيث أن ε_c هو انفعال الزحف ، σ هو الإجهاد و n , m هي ثوابت خاصة بالعلاقة.أحسب قيم n , m من النتائج المبينة في الجدول أدناه :

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

س16- تم الحصول على النتائج التالية من اختبار شد,فإذا كان قطر العينة الأعلى هو 12 mm والقطر بعد الكسر7 mm وطولها الأعلى هو 50 cm :

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

a) أرسم منحني 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

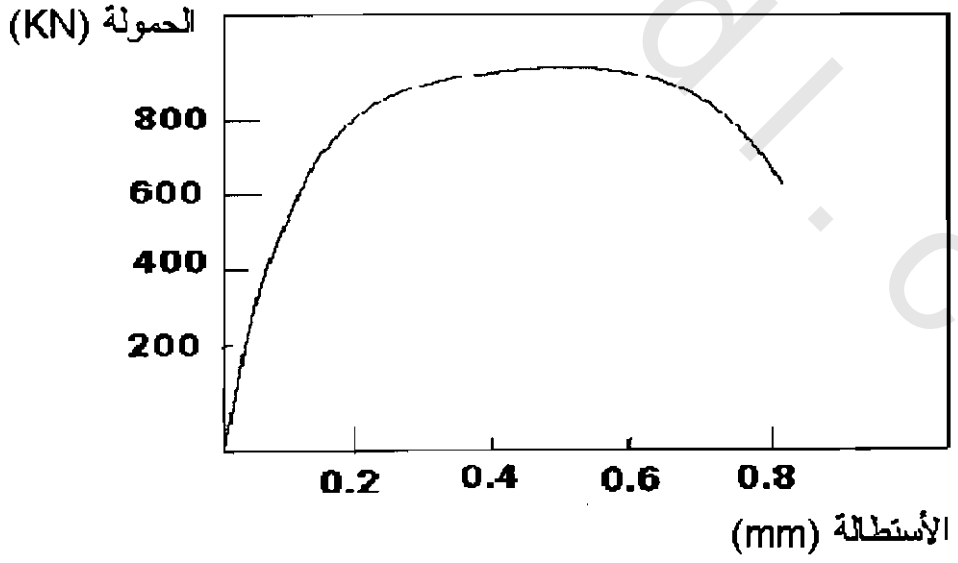
(7) معيار المتانة (8) معيار الرجوعية .

c) أرسم منحني الإجهاد – والانفعال الحقيقي .

س17– عينة شد مقطعها 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 :

$$\sigma_{true} = m\,\varepsilon_{true}^{n}$$

فأحسب قيمة الثوابت m و n .



الشكل (3–39)

منحنى عينة الشد في المسألة "17"

obeikandl.com

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 :

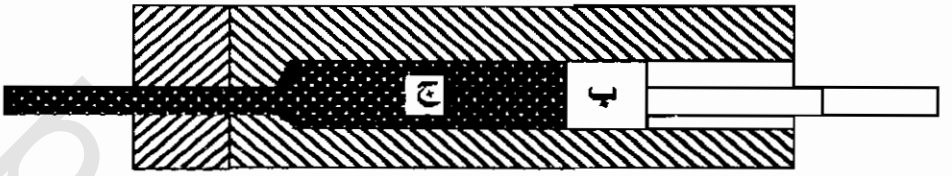
الحمل (KN)	11	16.5	22	27.5	33	38.5	44
التغير في الطول(mm)	0.1	0.7	1.9	2.6	5.1	6.6	8

1- أرسم منحني الإجهاد – الانفعال الحقيقي .

2- أحسب مقدار الانفعال الحقيقي ومقاومة الشد لهذا المعدن .

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

س22- مكبس بثق موضح في الشكل(3-40) ، فإذا كان الحمل اللازم لبثق المادة (ج) هـو 50KN ، أحسب الإجهاد الـناتج في كـل من الجزئين (أ و ب) ، إذا كان قطريهما 20mm ، 50mm على التوالي .



الشكل (3 - 40) يوضح مكبس بثق المستخدم في المسألة22

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

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

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

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

س25- أستبـدل أحد المصممين صلب حد إطاقتـه 518 MPa ، عنـد 10^6 دورة ، بسبيكة ألمنيوم حد أطاقتها 166MPa ، لذلك أضطر لزيـادة مسـاحة مقطع الجزء العرضي 3.125 مرة .هل توافقه على هذا القرار .