

الباب الرابع

فشل المواد الهندسية

Material Failure

الفصل الأول

طرق فشل المواد الهندسية أثناء الاستعمال

Method of Material Failure in Service

مقدمة: Introduction

الفشل هو عجز الجزء عن أداء مهامه أو عدم مقدرة الجزء على أداء وظيفته التي من أجلها صمم . وفشل المواد الهندسية غالبا ما يكون غير مرغوب فيه لعدد من الأسباب:

- يعرض حياة البشر للمخاطر.
 - فقد من الناحية الاقتصادية.
 - يؤثر على جاهزية وأداء المنتج أو الخدمة.
- وبالرغم من أن أسباب الفشل وسلوك المواد قد يكون معلوم إلا أن الوقاية من طرق الفشل المختلفة قد يكون صعب الضمان. وأسباب الفشل المعتادة هي:

- الاختيار الغير مناسب للمواد.
 - الاختيار الغير مناسب لطرق التصنيع والمعالجة.
 - التصميم الغير ملائم للجزء.
 - سوء الاستعمال (ظروف الاستعمال).
- أيضا الفشل يمكن أن يحدث لأجزاء البنية الهندسية خلال الخدمة وعمليات الفحص القياسي والصيانة أو تبديل الأجزاء مهم جدا لسلامة التصميم.

لماذا يدرس فشل المواد الهندسية: Why Study Failure

، وتصميم أي جزء أو بنية هندسية يتطلب من المهندس تقليل إمكانية الفشل والانهيار. لذلك لا بد له من فهم آلية **mechanics** حدوث طرق الفشل المختلفة من كسر وتمزق و فشل كلالي وزحف ... الخ. إضافة لذلك لا بد للمهندس من أن يكون على دراية بأساسيات التصميم التي تستخدم للوقاية من الفشل أثناء الاستخدام. مسؤولية المهندس أن يتوقع ويخطط للفشل المحتمل (حتى إذا لم يحدث) وان يقيم أسبابه ومن ثم يتخذ التدابير الوقائية المناسبة لمنع الحوادث المستقبلية.

طرق الفشل الأساسية:

تتعرض المواد الهندسية للفشل عند نهاية استعمالها تحت تأثير اجهادات مختلفة أو درجات حرارة مختلفة أو تحت تأثير المناخ أو ظروف التشغيل أثناء الاستعمال. ويمكن للمواد الهندسية أن تفشل بعدة طرق أهمها:

- (١) الكسر والتمزق . Fracture and Rapture
 (٢) الكلال والفشل الكلالي . Fatigue and Fatigue Failure
 (٣) الزحف وفشل الزحف . Creep and Creep Failure
 (٤) التآكسد والتآكل . Oxidation and Corrosion
 (٥) الاحتكاك واليلى . Friction and Wear

الكسر والتمزق : Fracture and Rapture

تتعرض المواد الهندسية للكسر والتمزق إذا تعرضت لتسليط اجهادات اكبر من الإجهادات المقاومة للشد أثناء استعمالها. ولكن تحت ظروف معينة - مثلا عند درجات الحرارة العالية - فان المواد الهندسية يمكن أن تتكسر وتتمزق عند استعمالها تحت اجهادات اقل من اجهادات مقاومة الشد للمادة أو حتى تحت اجهادات اقل من حد المرونة.

تختلف طريقة الكسر أو التمزق وشكلها من حالة إلى أخرى حسب الخواص الميكانيكية لتلك المادة ولكن عموما يتم الكسر والتمزق عندما يحدث كسر داخل كتلة المعدن فينمو ويزيد هذا الكسر بطول معين وبعده يسرع بسرعة فائقة ويؤدي إلى الكسر والتمزق بسرعة. عموما هنالك نوعان من الكسور والتمزق يمكن أن تحدث للمواد الهندسية عند تسليط اجهادات شد أو اجهادات ضغط عليها:

١. الكسر القصفي . Brittle Fracture

٢. الكسر المطيلي . Ductile Fracture

العوامل التي تؤثر على نوع الكسر : Factors effects the types of fracture

(١) معدل تسليط الحمل أو معدل الانفعال.

(٢) شكل القطعة وحالة سطحها.

(٣) درجة الحرارة.

(٤) قطر حبيبات المادة.

(٥) مكونات المادة.

الكلال والفشل الكلالي : Fatigue and Fatigue Failure

يحدث الكلال عادة عندما تتعرض المواد الهندسية وخاصة المواد الفلزية لاجهادات دورية Cycle stress. يمكن أن يحدث التصدع الكلالي تحت تأثير اجهادات دورية اقل من مقاومة الشد Tensile stress وأحيانا حتى اقل من مقاومة الخضوع للمادة.

بالنظر إلى استعمالات المواد الهندسية فإن الغالبية العظمى منها تقع تحت تأثير الإجهادات الدورية مثل اسطوانات الضغط والأعمدة الدوارة وريش التوربينات واذرع التوصيل وأجنحة الطائرات وغيره. ويمثل التصدع الكلالي 80% إلى 90% من فشل المواد أثناء الاستعمال.

يحدث التصدع الكلالي دائما نتيجة لحدوث شقوق صغيرة ونموها تحت تأثير الإجهاد للطول الحرج ثم نموها بسرعة مؤدية إلى حدوث الفشل الكلالي في المادة. عند تسليط اجهادات دورية على المادة فإنها تتعاقب عادة بين اجهادات شد وضغط ويعتمد حدوث الشق ونموه والذي يأخذ وقتا طويلا على طريقة تسليط الإجهاد وسرعة الدوران.

عموما يحدث التصدع الكلالي كفشل قصفي ويتبعه تشوه لدن قليل جدا ونسبة لان الإجهادات تتعاقب على المادة بين الضغط والشد فمن الصعب جدا رؤية الشق الكلالي لذا فان التصدع الكلالي من اخطر أنواع الفشل لأنه يحدث فجأة.

العوامل التي تؤثر على مقاومة الكلال: Factors effects the Fatigue failure

عوامل تتعلق بالمادة الهندسية:

(١) حجم الحبيبات.

(٢) المعالجات الحرارية.

(٣) المعالجات السطحية.

عوامل تتعلق بالبيئة وأوساط التشغيل:

(١) درجة الحرارة.

(٢) الفراغ.

(٣) الكلال التآكلي.

الزحف وفشل الزحف: Creep and Creep Failure

الزحف هو تشوه بطئ يحدث مع مرور الزمن نتيجة لتأثير الأحمال عند درجات حرارة عالية. ويعرف الزحف بأنه مقدار الانفعال الذي يحدث بمرور الزمن عندما تتعرض المادة الهندسية لتسليط حمل أو إجهاد ثابت تحت تأثير درجة حرارة ثابتة. يمكن أن يحدث الزحف تحت تأثير كل درجات الحرارة التي هي أعلى من درجة حرارة الصفر المطلق (-273°).

درجة الحرارة التي يحدث عندها الزحف تعتمد على درجة انصهار المادة المعينة (Tm) فالمواد المعدنية يحدث لها الزحف إذا كانت درجة الحرارة اعلي من 0.3Tm أو 0.4Tm، أما المواد السيراميك فيحدث فيها الزحف تحت تأثير درجة حرارة أعلى من 0.4Tm أو 0.5Tm حيث Tm درجة انصهار المادة بالكلفين.

يمكن أن يحدث الزحف تحت تأثير اجهادات اقل من إجهاد الشد الأقصى أو تحت تأثير إجهاد اقل من إجهاد الخضوع. وانفعال الزحف يعتمد على الإجهاد أو الحمل والزمن ودرجة الحرارة.

$$\square = f(\sigma, T, t)$$

□ : انفعال الزحف.

σ : الإجهاد.

T : درجة الحرارة.

t : الزمن.

التآكل والتأكسد : Oxidation and Corrosion

يمكن تعريف التآكل بأنه انهيار المواد الهندسية وخاصة المواد الفلزية نتيجة تفاعلها مع الجو المحيط بها ويتم ذلك طبيعياً، حيث تحاول المواد الفلزية العودة مرة أخرى إلى حالتها الطبيعية الأولى قبل تنقيتها.

هذا التعريف يفترض أن كل المواد الهندسية يحصل لها تآكل لكن بمعدلات مختلفة وبصور مختلفة حسب نوع المادة أو الجو المحيط بها.

من المعروف أن كل المواد الفلزية أو الغالبية العظمى منها توجد في الطبيعة في شكل أكاسيد. لتنقية هذه المواد تستعمل الطاقة الحرارية وبعد عملية التنقية تكون المادة المنقاة تحتوي على طاقة أعلى من الطاقة التي كانت بها قبل تنقيتها. تستعمل هذه الطاقة المكتسبة من عملية التنقية أثناء عملية التآكل لإرجاع المادة إلى صورتها الطبيعية.

عملية التآكل تعتمد على الطاقة المخزونة في المادة المكتسبة أثناء التنقية. تكتسب المواد الهندسية عدة أنواع من الطاقة ، وتعتبر الطاقة الكهربائية هي التي تؤدي إلى حدوث التآكل. عملية التآكل عملية غير عكسية فعندما يبدأ التآكل لا يمكن إرجاعه لأن التيار الكهربائي المار في المعدن هو تيار مستمر وليس متردد.

عملية التآكل عملية معقدة وتشارك فيها عدة عوامل تحدد سرعة ومعدل التآكل ويمكن تقسيمها إلى:

١. عوامل تتعلق بالمادة نفسها.
 ٢. عوامل تتعلق بالوسط المحيط بالمادة أثناء الاستعمال.
- العوامل المتعلقة بالمادة الهندسية:**
- (١) موقع المادة أو المعدن في السلسلة الكهروكيميائية.
 - (٢) تلاقى المواد المختلفة الغير متشابهة لاختلاف الشحنات الكهربائية.
 - (٣) البنية الداخلية للمادة ومدى نقاوتها.
 - (٤) وجود اجهادات داخلية ناشئة من عمليات التصنيع.
- العوامل المتعلقة بالوسط المحيط بالمادة أثناء الاستعمال:**
- (١) الرطوبة النسبية.
 - (٢) وجود الشوائب والأبخرة الكيميائية.
 - (٣) معدل توزيع الأكسجين.
 - (٤) وجود الإجهادات الخارجية الناتجة من عمليات التحميل.

الاحتكاك والبلى: Friction and Wear

يمكن تعريف البري أو البلى بأنه العملية الميكانيكية التي يتم فيها إزالة المعدن أو نزع جزء من سطح المعدن أو المادة الهندسية. وبالنظر إلى عمل الأجزاء الهندسية نجد كثير منها تتحرك فوق بعضها البعض مثل حركة الكباس مع الاسطوانة وحركة عمود الدوران على كراسي التحميل. نتيجة لهذه الحركة يحدث الاحتكاك الذي يزيل جزء من سطح المعدن عند نقاط التلاقي بين القطعتين.

المساحة التي يتلاقى فيها أسطح القطعتين تكون صغيرة جدا (50%) مقارنة بمساحة السطح الكلية حيث يحدث التلاقي فقط في المساحات المرتفعة من سطح القطعتين.

عملية الاحتكاك غير مرغوب فيها أثناء حركة الأجزاء الهندسية مع بعضها البعض للأسباب الآتية:

١. جزء كبير من الطاقة يستهلك في مقاومة الاحتكاك.
٢. عملية الاحتكاك تؤدي إلى إزالة جزء من سطح المادة وبالتالي تغيير مقدار التفاوت المسموح به وتؤدي إلى زيادة الخلوص بين القطعتين وبالتالي اختلال عملهما.

الفصل الثاني الكسر

Fracture

المبادئ الأساسية للكسر: Fundamentals of Fracture

الكسر البسيط هو انفصال الجسم لجزأين أو أكثر نتيجة لتعرضه لإجهاد استاتيكي (الحمل ثابت أو متغير ببطء مع الزمن) عند درجة حرارة تكون منخفضة نسبياً عن درجة انصهار المادة.

الكسر يمكن أن يحدث نتيجة للكلال (في حالة الإجهادات الدورية) أو الزحف (تشوه يعتمد على الزمن عند درجات الحرارة المرتفعة).

الإجهاد الذي يحدث الكسر يمكن أن يكون إجهاد شد **tensile** أو ضغط **compressive** أو قص **shear** أو لي **torsion** أو مركب من أكثر من نوع **combination** (النقاش يقتصر على الكسر الناتج من أحمال الشد في محور واحد **uniaxial tensile loads**).

في حالة المعادن هنالك نوعين محتملين من الكسر:

A. الكسر المطيبي. **Ductile Fracture**.

B. الكسر القصفي. **Brittle Fracture**.

هذا التصنيف مبني على قابلية المادة للتعرض للتشوه اللدن **plastic deformation**، حيث أن المعادن المطييلة تبدي تشوه لدن كبير يصاحبه امتصاص عالي للطاقة قبل الكسر. من ناحية أخرى فإن الكسر القصفي في العادة يكون فيه التشوه اللدن معدوم أو قليل وبصاحبه امتصاص منخفض للطاقة (الشكل ١).

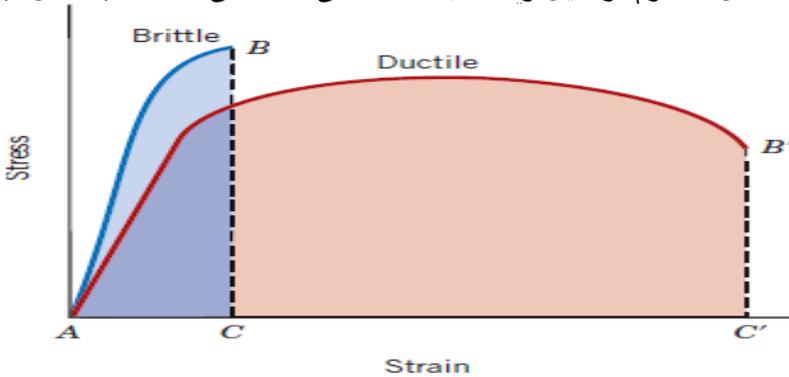


Figure 1 Schematic representations of tensile stress–strain behavior for brittle and ductile metals loaded to fracture.

الشكل (١) سلوك الإجهاد - الانفعال للمعادن القصفيه والمطيبيه عند تحميلها حتى الكسر

مطيليه أو قصفافة الكسر حالة نسبية تعتمد على عدة عوامل منها:

• درجة حرارة المادة. **Temperature of material**

• معدل الانفعال. **Stain rate**

• حالة الإجهاد. **Stress state**

في العادة أي عملية كسر تتكون من مرحلتين:

A. تكون شق صغير. **Crack formation**

B. نمو الكسر استجابة للإجهاد المسلط. **Propagation in response to an**

imposed stress

أسلوب (طريقة) الكسر يعتمد اعتمادا كبيرا على آلية نمو الشق. فالكسر المطيلي يتميز بتشوه لدن واسع في المناطق المجاورة لمقدمة الشق والعملية تتقدم ببطء نسبيا مع زيادة طول الشق. في بعض الأحيان يكون الشق مستقر **stable** لأنه يقاوم أي زيادة في طوله ما لم تحدث زيادة في مقدار الإجهاد المسلط. بالإضافة لذلك يكون هنالك دليل على تشوه كثيف يمكن تقديره في سطح الكسر في شكل تمزق والتواءات.

في حالة الكسر القصفي التشققات تنتشر سريعا للغاية يصاحبها تشوه لدن قليل جدا، وبعض الشقوق يمكن أن يقال عنها غير مستقرة ونمو الشق عندما يبدأ يتواصل تلقائيا من غير أي زيادة في مقدار الإجهاد المسلط.

الكسر المطيلي دائما يفضل على القصفي لسببين:

أولاً: الكسر القصفي يحدث فجأة وبطريقة كارثية من غير أي تحذير ذلك نتيجة لتلقائية وسرعة نمو الشق، في حين انه في الكسر المطيلي وجود التشوه اللدن يعطي تحذير بان الفشل وشيك مما يسمح باتخاذ بعض التدابير الوقائية.

ثانياً: طاقة الانفعال المطلوبة لإحداث الكسر المطيلي تكون اكبر لان هذه المواد عموما متينة.

تحت تأثير إجهاد الشد معظم سبائك المعادن تكون مطيليه في حين أن المواد السيراميك قصفيه أما اللدائن فتبدي مدى واسع من السلوك.

الكسر المطيلي: Ductile Fracture

أسطح الكسر المطيلي لها صفات مميزة في مستوى النظر بالعين المجردة أو المستوى المجهرى. الشكل (٢) عبارة عن رسومات توضيحية لما يبدو عليه الكسر عند النظر بالعين المجردة.

الرسم التوضيحي (الشكل ٢a) يوجد في حالة المواد الطرية للغاية مثل الذهب والرصاص النقيان عند درجة حرارة الغرفة والمعادن الأخرى واللدائن والزجاج الغير عضوي عند درجات الحرارة المرتفعة. وهذه المواد العالية المطيلية تتخصر إلى أن يصبح الكسر في شكل نقطة بحيث تظهر تخفيض في مساحة المقطع بنسبة 100% . النوع الأكثر شيوعا لكسر الشد للمعادن الطرية هو الممثل بالرسم (16.2b) حيث أن الكسر يسبقه مقدار معتدل من التخصر.

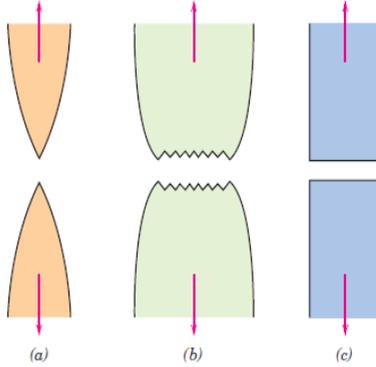


Figure 2 (a) Highly ductile fracture in which the specimen necks down to a point. (b) Moderately ductile fracture after some necking. (c) Brittle fracture without any plastic deformation.

الشكل (٢) (a) كسر عالي المطيلية فيه تخصرت العينة بصوره حادة. (b) كسر معتدل المطيلية مع بعض التخصر. (c) كسر قصفي من غير أي تشوه لدن. النوع الأكثر شيوعا لكسر الشد للمعادن الطرية هو الممثل بالرسم (٢b) حيث أن الكسر يسبقه مقدار معتدل من التخصر.

عملية الكسر المطيلي عادة تحدث في مجموعة من المراحل كما يوضحه (الشكل ٣):

- بداية التخصر.
- تشكل تجاويف صغيرة وفجوات مجهرية في المقطع الداخلي.
- مع مواصلة التشوه تتوسع الفجوات المجهرية وتقترب من بعضها البعض ثم تندمج مكونة شق بيضاوي محوره الطويل يكون عموديا على اتجاه الإجهاد.
- الشق يواصل النمو في اتجاه موازي لمحوره الرئيسي عن طريق عملية اندماج الفجوات المجهرية.
- أخيرا ينشأ الكسر بواسطة النمو السريع للشق حول المحيط الخارجي للتخصر بواسطة تشوه قص عند زاوية حوالي 45° مع محور الشد - هذه الزاوية عند أقصى قيمة لإجهاد القص.

في بعض الأحيان الكسر المطيلي يتميز بمحيط سطح يطلق عليه كسر كوب-مخروط **cup-and-cone fracture** لان احد الأسطح الملتقية للكسر في شكل كوب والآخر في شكل مخروط.

في هذا النوع من عينات الكسر (الشكل ٤ a) المنطقة الداخلية الوسطى للسطح لها مظهر غير منتظم **irregular** وخشن **fibrous** مما يدل للتشوه اللدن.

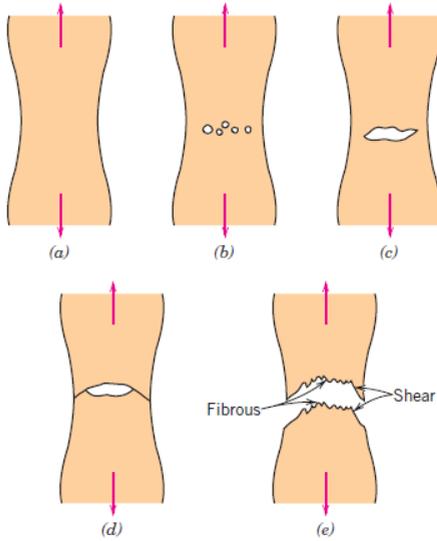
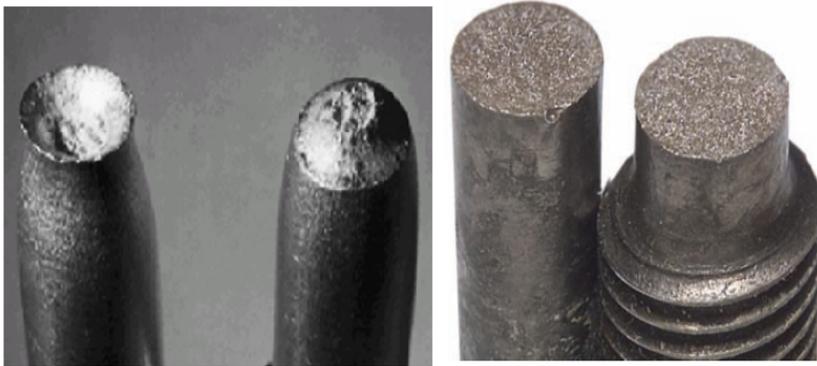


Figure 3 Stages in the cup-and-cone fracture. (a) Initial necking. (b) Small cavity formation. (c) Coalescence of cavities to form a crack. (d) Crack propagation. (e) Final shear fracture at a 45° angle relative to the tensile direction.

الشكل (٣) مراحل الكسر المطيلي



(a)

(b)

Figure 4 (a) Cup-and-cone fracture in aluminum.

(b) Brittle fracture in a mild steel.

الشكل (٤) (a) كسر كوب-مخروط لعينه من الألمنيوم. (b) كسر قصفي لعينه

من الصلب.

دراسة تخطيط (صورة) الكسر: Fractographic Studies

يمكن الحصول على معلومات إضافية مفصلة تتعلق بآلية الكسر عند الفحص المجهري باستخدام مجهر الكتروني، والدراسات من هذا النوع تعرف بتخطيط (صورة) الكسر Fractographic. والمجهر الالكتروني يفضل عن الضوئي لأنه يظهر الوصف الدقيق لأسطح الكسر لما يتميز به من ثبات و عمق ومجال تكبير للصورة.

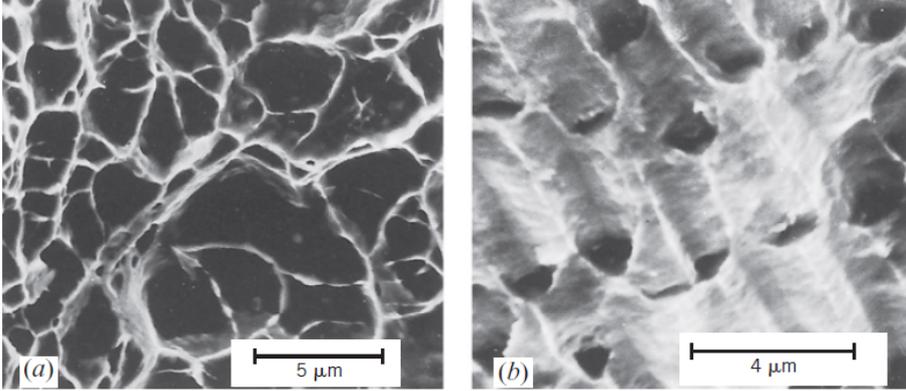


Figure 5 (a) Scanning electron fractograph showing spherical dimples characteristic of ductile fracture resulting from uniaxial tensile loads. 3300×. (b) Scanning electron fractograph showing parabolic-shaped dimples characteristic of ductile fracture resulting from shear loading. 5000×.

الشكل (٥) تخطيط (صورة) Fractographic الكسر المطيلي بواسطة المجهر الالكتروني

عند فحص المناطق الوسطى الخشنة لسطح الكسر الكوب-مخروط باستخدام المجهر الالكتروني بتكبير عالي فإنها تحتوي على نقر (حفر) كروية Spherical dimples متعددة (الشكل ٥ a)، وهذه البنية تميز الكسر الناتج من إجهاد الشد في محور واحد، وكل نقرة عبارة عن نصف فجوة مجهريه نشأت ثم انفصلت خلال عملية الكسر.

النقر أيضا تنشأ في الكسر الكوب-مخروط عند حافة القص بزاوية 45° لكنها تستطيل أو تأخذ شكل الحرف C (C-shape) (الشكل ٥ b)، وهذا القطع المكافئ يدل على إجهاد القص.

يمكن أن يكون هنالك صور وهيئات مجهريه أخرى لسطح الكسر ودراسة تخطيط الكسر Fractographic كما في الشكل (٥) تعطي معلومات قيمة عند تحليل الكسر تظهر أسبابه مثل:

- أسلوب (طريقة) الكسر.

- حالة الإجهاد.
- مكان بداية الشق.

الكسر القصفي: Brittle Fracture

الكسر القصفي يحدث بنمو سريع للشق بدون تشوه ملحوظ واتجاه حركة الشق تكون تقريبا عمودية على اتجاه إجهاد الشد المسلط وتنتج سطح كسر مستوي نسبيا كما في الشكل ٢ c.

أسطح الكسر للمواد التي تقع تحت النمط القصفي لها نماذج مميزة لها وأي إشارة للتشوه الدن تكون غائبة. مثال لذلك في بعض قطع الفولاذ سلسلة من العلامات في شكل الحرف V (V-shape) تتشكل بالقرب من مركز مقطع الكسر تشير إلى مكان نشوء (بداية) الكسر (الشكل ٥ a).

بعض أسطح الكسر القصفي تحتوي على خطوط أو سلسلة تلال متشعبة من مصدر (أصل) الشق في شكل مروحة fanlike (الشكل ٦ b).

عادة هذين النموذجين يكونان خشنين كفاية ليريا بالعين المجردة، لكن المعادن الصلدة ذات الحبيبات الدقيقة جدا لا يكون هنالك نموذج مرئي لكسر.

الكسر القصفي للمواد الغير بلورية amorphous مثل السيراميك والزجاج تنتج سطح مستوى ولامع نسبيا.

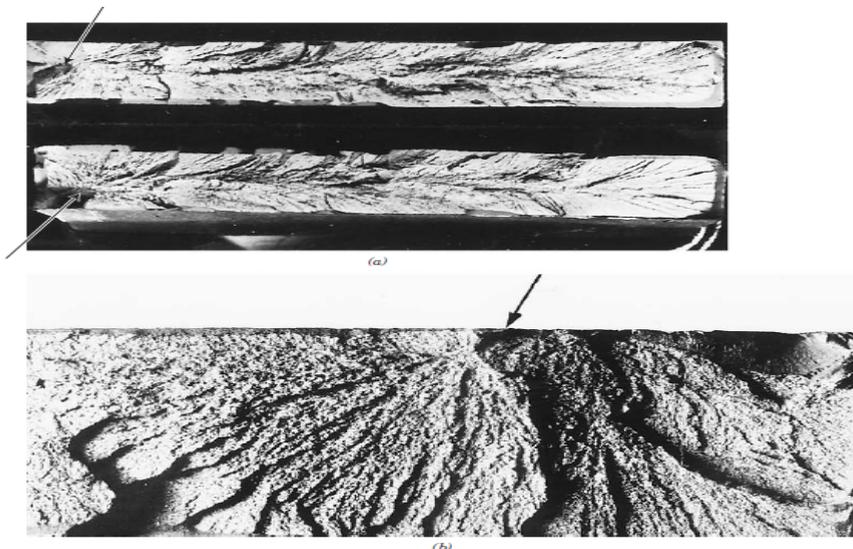


Figure 6 (a) Photograph showing V-shaped "chevron" markings characteristic of brittle fracture. Arrows indicate origin of crack. Approximately actual size. (b) Photograph of a brittle fracture surface showing radial fan-shaped ridges. Arrow indicates origin of crack.

الشكل (٦) تخطيط (صورة) Fractographic الكسر القصفي بواسطة

المجهر الالكتروني

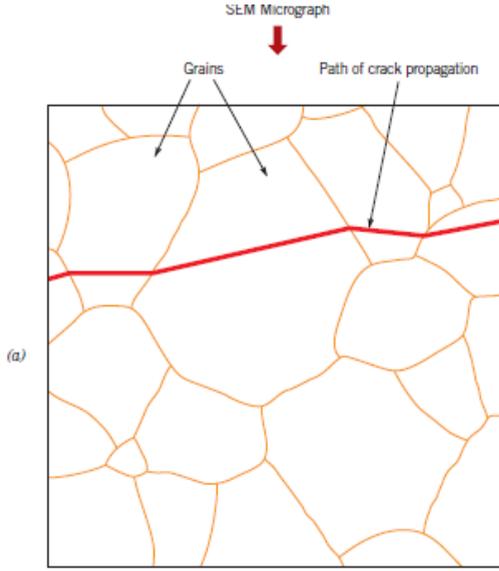
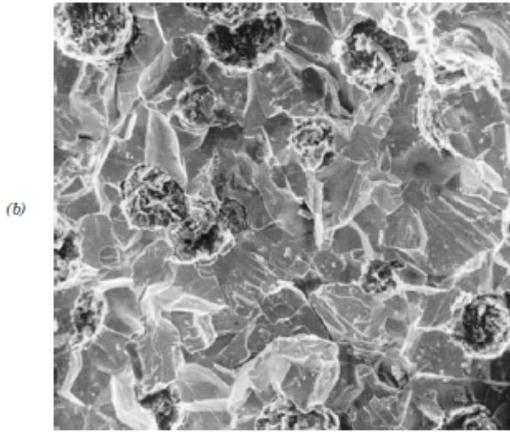


Figure 7 (a) Schematic cross-section profile showing crack propagation through the interior of grains for transgranular fracture. (b) Scanning electron fractograph of ductile cast iron showing a transgranular fracture surface.



الشكل (٧) الكسر خلال الحبيبات transgranular fracture

لمعظم المواد البلورية نمو الشق يكون مناظر للانفصال المتتابع والمتكرر للروابط الذرية خلال مستويات بلورية محددة (الشكل ٧ a) وهذه العملية تسمى انقسام cleavage . هذا النوع من الكسر يمكن أن يقال عنه كسر من خلال الحبيبات transgranular fracture لأن شقوق الكسر تمر من خلال الحبيبات. بالعين المجردة سطح الكسر يكون له تركيب حبيبي (الشكل ٤ b) كنتيجة لتغير مستويات الانقسام من حبيبة لحبيبة. هيئة الانقسام هذه ترى بتكبير عالي لمجهر الكتروني كما في الشكل (٧ b) .

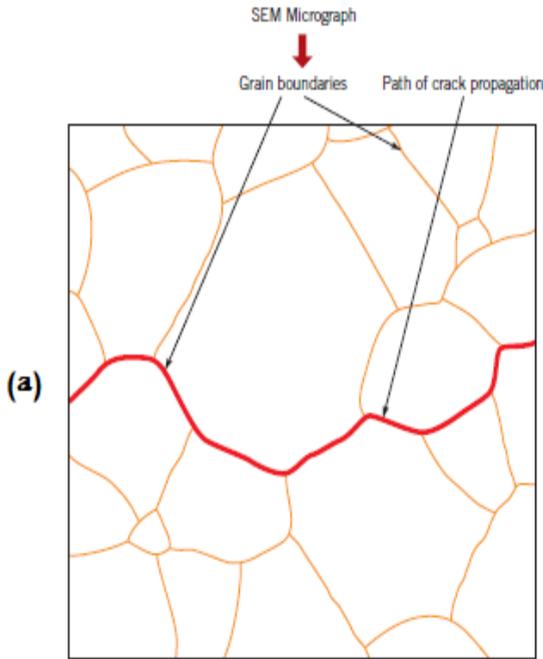
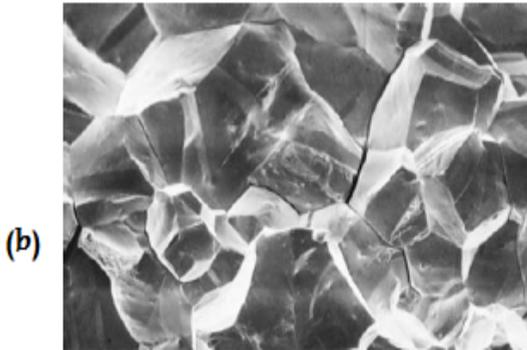


Figure 8 (a) Schematic cross-section profile showing crack propagation along grain boundaries for intergranular fracture. (b) Scanning electron fractograph showing an intergranular fracture surface.



الشكل (٨) الكسر حدود الحبيبات intergranular fracture

لبعض السبائك نمو الشق يكون على امتداد الحدود الحبيبية (الشكل ٨ a) وهذه الهيئة تسمى بكسر حدود الحبيبات **intergranular fracture**. الشكل ٨ b) يظهر صورة كسر حدود الحبيبات بالمجهر الالكتروني حيث ترى الطبيعة ثلاثية الأبعاد 3D للحبيبات. هذا النوع من الكسر عادة يكون نتيجة تعقب حدوث عمليات تؤدي لإضعاف وقصافة مناطق الحدود الحبيبية.

الفصل الثالث

قواعد ميكانيكا الكسر

Principles of Fracture Mechanics

مقدمة: Introduction

رغم إعمال قواعد التصميم للأداء وللمتانة إلا أنه حدثت حوادث كارثية خلال القرن السابق ناتجة من الفشل الغير المتوقع للمواد الهندسية (مثل الكسر القصفي للمواد التي في العادة تكون مطيلة) هذا بدوره اثبت الحوجه للفهم الجيد لآلية طرق الفشل مما قاد لمحاولات بحث واسعة قادت إلى ثورة في مجال فشل المواد الهندسية وجعلت مهندسي التصميم الآن مجهزين جيدا لتوقع الفشل في البنية الهندسية والوقاية منه.

النقاش الحالي متمركز على بعض المبادئ الأساسية لميكانيكا الكسر **Fracture Mechanics** والذي يعنى بالتقدير الكمي للعلاقات بين:

- خواص المواد . Material Properties .
- مستوى الإجهاد. Stress Level .
- وجود العيوب المنتجة للشق. The presence of crack-producing flaws .
- آليات نمو الشق. Crack propagation mechanisms .

تركيز الإجهاد: Stress concentration

مقدار متانة الكسر لمعظم المواد تكون اقل بكثير من المتنبأ بها بالحسابات النظرية المبنية على أساس طاقات الروابط الذرية. هذا يفسر بوجود عيوب مهجرية وشقوق على سطح وداخل جسم القطعة الهندسية في الظروف الطبيعية وهذه العيوب هي التي تحدد متانة الكسر لان الإجهاد المسلط يتركز **concentrated** وتكبر **amplified** قيمته عند مقدمتها ومقدار التكبير يعتمد على شكل واتجاه الشق. هذه الظاهرة تشرح بالشكل (١) الذي يوضح صورة جانبية للإجهاد لمقطع (X-X') يحتوي على شق داخلي. كما يشير هذا الشكل فان قيمة الإجهاد الموضعي تناقص كلما زادت المسافة من مقدمة الكسر حتى يصل لمواضع بعيدة يكون فيها الإجهاد مساوي للإجهاد العادي σ_0 (الحمل المسلط مقسوم على مساحة مقطع العينة العمودية لهذا الحمل). ونسبة لقابليتها لتكبير الإجهاد موضعيا هذه العيوب تسمى روافع الإجهاد **stress raisers**.

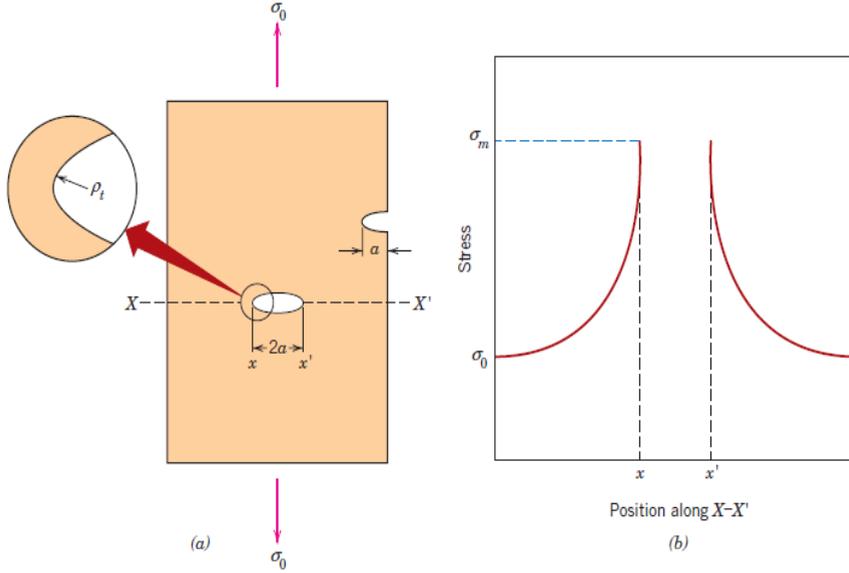


Figure 1 (a) The geometry of surface and internal cracks. (b) Schematic stress profile along the line $X-X'$ in (a), demonstrating stress amplification at crack tip positions.

الشكل (١) تركيز الإجهاد في مقدمة الشقوق السطحية والداخلية

حساب الإجهاد الأقصى عند مقدمة الشق (لحمل الشد):

Maximum Stress computation at crack tip for tensile loading

بافتراض أن الشق يأخذ شكل تجويف بيضاوي داخل لوح ويكون عموديا على الإجهاد المسلط فإن الإجهاد الأقصى σ_m يحدث عند مقدمة الشق ويكون تقريبا:

$$\sigma_m = 2\sigma_0 \left(\frac{a}{\rho_t} \right)^{1/2} \quad (1)$$

حيث أن:

σ_0 : القيمة العادية لإجهاد الشد المسلط.

ρ_t : نصف قطر الانحناء لمقدمة الشق.

a : طول الشق السطحي أو نصف طول الشق الداخلي.

للشق المجري الطويل نسبيا الذي له نصف قطر انحناء صغير فإن المعامل

$(a/\rho_t)^{1/2}$ يكون كبير جدا، هذا ينتج قيمة σ_m تكون ضعف قيمة σ_0 .

في بعض الأحيان النسبة σ_m / σ_0 تعرف بمعامل تركيز الإجهاد K_t والذي

ببساطة يقيس الدرجة التي يحدث بها التكبير للإجهاد الخارجي في مقدمة الشق:

$$K_t = \frac{\sigma_m}{\sigma_0} = 2 \left(\frac{a}{\rho_t} \right)^{1/2} \quad (2)$$

تركيز وتكبير الإجهاد لا يقتصر فقط على العيوب المجهرية ويمكن إن يحدث في:

- المناطق الداخلية المتقطعة المرئية (مثل الشوائب inclusion والتجاويف voids).

- الأركان الحادة sharp corner.

- الخدوش والثلثات في سطح القطعة scratches and notches.

الإجهاد الحرج المطلوب لنمو الشق في المواد القصفية:

Critical stress for crack propagation in a brittle materials

تأثير روافع الإجهاد يكون كبيرا في المواد القصفية عن المواد المطيلة، لأنه في المواد المطيلة ينتج تشوه لدن عندما تتجاوز قيمة الإجهاد الأقصى في مقدمة الشق σ_m قيمة متانة الخضوع. هذا يقود لتوزيع أكثر انتظاما للإجهاد في المناطق المجاورة لرافعة الإجهاد ولنشوء معامل تركيز إجهاد أقصى يكون اقل من القيمة النظرية K_t . في المواد القصفية لا يحدث أي خضوع ولا إعادة توزيع للإجهاد حول رافعة الإجهاد لذلك تنتج القيمة النظرية لمعامل تركيز الإجهاد K_t .

باستخدام قواعد ميكانيكا الكسر Principles of fracture mechanics يمكن وصف الإجهاد الحرج Critical stress المطلوب لنمو الشق في المواد القصفية σ_c بالمعادلة:

$$\sigma_c = \left(\frac{2E\gamma_s}{\pi a} \right)^{1/2} \quad (3)$$

حيث أن:

E: معامل المرونة. Modulus of elasticity

γ_s : طاقة السطح النوعية. Specific surface energy

a: طول الشق السطحي أو نصف طول الشق الداخلي. The length of a

surface crack, or half of the length of internal crack

كل المواد القصفية تحتوي على عيوب صغيرة لها أشكال وأحجام واتجاهات مختلفة وعندما تتجاوز قيمة إجهاد الشد في مقدمة احد هذه العيوب قيمة الإجهاد الأقصى σ_c يتكون الشق ثم ينمو تلقائيا محدثا الكسر.

EXAMPLE PROBLEM

Maximum Flaw Length Computation

A relatively large plate of a glass is subjected to a tensile stress of 40 MPa. If the specific surface energy and modulus of elasticity for this glass are 0.3 J/m² and 69 GPa, respectively, determine the maximum length of a surface flaw that is possible without fracture.

Solution

To solve this problem it is necessary to employ Equation 8.3. Rearrangement of this expression such that a is the dependent variable, and realizing that $\sigma = 40$ MPa, $\gamma_s = 0.3$ J/m², and $E = 69$ GPa, leads to

$$\begin{aligned} a &= \frac{2E\gamma_s}{\pi\sigma^2} \\ &= \frac{(2)(69 \times 10^9 \text{ N/m}^2)(0.3 \text{ N/m})}{\pi(40 \times 10^6 \text{ N/m}^2)^2} \\ &= 8.2 \times 10^{-6} \text{ m} = 0.0082 \text{ mm} = 8.2 \mu\text{m} \end{aligned}$$

قساوة (متانة) الكسر : Fracture toughness

باستخدام قواعد ميكانيكا الكسر يمكن حساب قساوة الكسر K_C والتي تعتمد على الإجهاد الحرج المطلوب لنمو الشق في المواد القصفيه σ_c و طول الشق a من المعادلة:

$$K_c = Y\sigma_c \sqrt{\pi a} \quad (4)$$

قساوة (متانة) الكسر K_C عبارة عن إحدى الخواص الميكانيكية **mechanical property** تقيس مقاومة المادة للكسر القصفي عند وجود شق ولها وحدات قياس استثنائية هي $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ أو $\text{psi}\sqrt{\text{in}}$.

Y دالة (معامل) ليس لها تمييز **dimensionless parameter or function** تعتمد على حجم وشكل كل من العينة والشق بالإضافة لطريقة تسليط الحمل. عينة مستوية تحتوي على شقوق طولها اقل بكثير من عرض العينة قيمة الدالة Y تقريبا تساوي واحد، مثال لذلك في الشكل (2 a) الشريحة لها عرض لانهائي و بها شق نافذ خلال المقطع $Y=1.0$ في حين أنه في الشكل (2 b) الشريحة لها عرض شبه لانهائي وتحتوي على شق في الحافة قيمة $Y \approx 1.1$.

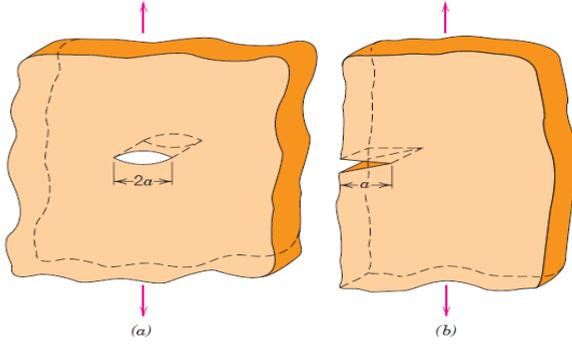


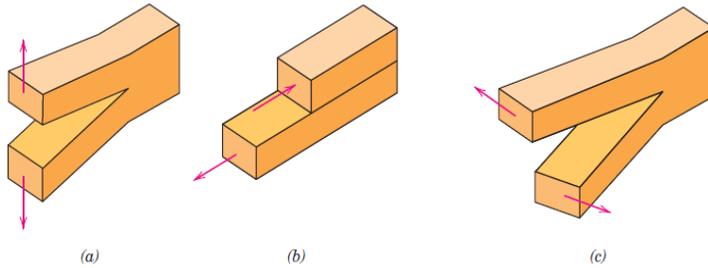
Figure 2 Schematic representations of (a) an interior crack in a plate of infinite width and (b) an edge crack in a plate of semi-infinite width.

الشكل (a2) الشريحة لها عرض لانهائي وبها شق نافذ خلال المقطع (b) الشريحة لها عرض شبه لانهائي وتحتوي على شق في الحافة.

قساوة (متانة) الكسر للانفعال المستوي: Plane strain fracture toughness

للعينات الرفيعة نسبيا قيمة قساوة الكسر K_{IC} تعتمد على سمك العينة في حين انه إذا كان سمك العينة اكبر بكثير من أبعاد الشق قيمة K_{IC} تصبح لا تعتمد على السمك وتحت هذه الظروف توجد حالة الانفعال المستوي **plane strain**. حالة الانفعال المستوي **plane strain** يقصد بها عندما يعمل الحمل على الشق بالطريقة الموضحة بالشكل (a3) ولا تكون هناك مركبة انفعال عمودية على الأوجه الأمامية والخلفية (**mode I, opening or tensile mode**) وهي الحالة الأكثر شيوعا.

Figure 3 The three modes of crack surface displacement. (a) Mode I, opening or tensile mode; (b) mode II, sliding mode; and (c) mode III, tearing mode.



الشكل (3) الهياكل الثلاثة لإزاحة سطح الشق

قيمة قساوة الكسر في حالة الانفعال المستوي للعينات السميكة تعرف بقساوة (متانة) الكسر للانفعال المستوي (K_{IC}) **plane strain fracture toughness** وتعطى بالعلاقة:

$$K_{IC} = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (5)$$

للمواد القصفي التي لا يوجد فيها تشوه لدن في مقدمة الكسر قيمة K_{1C} تكون منخفضة وتعرض إلى فشل كارثي. من ناحية أخرى قيمة K_{1C} نسبيا تكون كبيرة في المواد المطيلة ، ميكانيكا الكسر تكون مفيدة للتنبؤ بالفشل الكارثي للمواد التي لها مطيليه متوسطة . الجدول (١) يوضح قيمة K_{1C} لعدد من المواد المختلفة. قساوة الكسر للانفعال المستوي K_{1C} خاصية ميكانيكية أساسية للمواد وتعتمد على مجموعة من العوامل أهمها:

• درجة الحرارة. temperature

• معدل الانفعال strain rate

• البنية المجهرية microstructure

قيمة K_{1C} تتناقص بزيادة معدل الانفعال وانخفاض درجة الحرارة. التحسين في متانة الخضوع المصنوع بمحلول صلب solid solution أو شتيت إضافات additions أو أصلاد انفعالي strain hardening ينتج انخفاض مناظر في قيمة K_{1C} . وقيمة K_{1C} تزيد بنقصان حجم الحبيبات إذا كانت المحتويات والمتغيرات الأخرى في البنية المجهرية ثابتة. لقياس K_{1C} تستخدم تقنيات اختبار مختلفة ومتعددة .

Table 17.1 Room-Temperature Yield Strength and Plane Strain Fracture Toughness Data for Selected Engineering Materials

Material	Yield Strength		K_{Ic}	
	MPa	ksi	MPa \sqrt{m}	ksi $\sqrt{in.}$
Metals				
Aluminum alloy ^a (7075-T651)	495	72	24	22
Aluminum alloy ^a (2024-T3)	345	50	44	40
Titanium alloy ^a (Ti-6Al-4V)	910	132	55	50
Alloy steel ^a (4340 tempered @ 260°C)	1640	238	50.0	45.8
Alloy steel ^a (4340 tempered @ 425°C)	1420	206	87.4	80.0
Ceramics				
Concrete	—	—	0.2–1.4	0.18–1.27
Soda-lime glass	—	—	0.7–0.8	0.64–0.73
Aluminum oxide	—	—	2.7–5.0	2.5–4.6
Polymers				
Polystyrene (PS)	25.0–69.0	3.63–10.0	0.7–1.1	0.64–1.0
Poly(methyl methacrylate) (PMMA)	53.8–73.1	7.8–10.6	0.7–1.6	0.64–1.5
Polycarbonate (PC)	62.1	9.0	2.2	2.0

Design using fracture mechanics : ميكانيكا الكسر :

طبقا للمعادلتين (4) و(5) هنالك ثلاث متغيرات لا بد من أن تأخذ في الاعتبار بالنسبة لاحتمال الكسر في جزء هندسي:

- متانة الكسر K_{IC} أو متانة الكسر للانفعال المستوي K_{IC} (خواص المادة).
 - الإجهاد المسلط (σ) .Impose stress
 - مقاس العيب (a) .Flaw size
- (ذلك بافتراض أن قيمة Y تم تحديدها)

عند تصميم جزء أولا لا بد من تقرير أي من هذه المتغيرات تتقيد بالتطبيق و أي منها تخضع للتحكم في التصميم. مثال اختيار المادة المناسبة (بالتالي قيمة K_{IC} أو K_{IC}) دائما يقيد ببعض العوامل مثل الكثافة (للتطبيقات ثقيلة الوزن) وخصائص التآكل للبيئة. أيضا مقاس العيب المسموح به يمكن أن يقاس أو يمكن أن يعين في حالة عدم وجود تقنية لاكتشاف العيب.

بمعرفة أي اثنين من المتغيرات السابقة فان الثالثة يمكن حسابها. مثال لذلك بافتراض أن K_{IC} وقيمة a تم تعيينهما باستخدام قيود التطبيق فان إجهاد التصميم (الإجهاد الحرج) σ_c يمكن حسابه بالمعادلة:

$$\sigma_c = \frac{K_{Ic}}{Y\sqrt{\pi a}} \quad (6)$$

إذا كان مستوى الإجهاد σ و قساوة الكسر للانفعال المستوي K_{IC} ثابتان نسبة لحالة التصميم فان أقصى مقاس عيب مسموح به يمكن حسابه بالمعادلة:

$$a_c = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma Y} \right)^2 \quad (7)$$

العيوب و الاختبارات اللائتلافية: (NDT) Nondestructive test

الجدول (17.2) يوضح مجموعة الاختبارات اللائتلافية **nondestructive test** (NDT) المستخدمة لاكتشاف وقياس كل من العيوب الداخلية والسطحية. وكما يدل اسمها هذه التقنيات لا تدمر البنية أو المادة تحت الاختبار. بعض هذه الاختبارات تستخدم لأجزاء هندسية أثناء استخدامها لاكتشاف العيوب التي تؤدي للفشل المبكر، بالإضافة لذلك يمكن أن تستخدم كأداة ضبط جودة لعمليات التصنيع. بعض هذه الاختبارات تثبت وتستخدم في المختبر وبعضها يمكن استخدامه في الحقل.

- بالميكروسكوب الالكتروني (SEM) Scanning electron microscopy
- الصبغة النفاذة Dye penetrant

- Ultrasonic الموجات فوق الصوتية
- Optical microscopy بالميكروسكوب الضوئي
- Visual inspection الفحص البصري
- Acoustic emission الانبعاث الصوتي
- Radiography (x-ray/gamma ray) التصوير بالأشعة

Table 17.2 A List of Several Common Nondestructive Testing (NDT) Techniques

<i>Technique</i>	<i>Defect Location</i>	<i>Defect Size Sensitivity (mm)</i>	<i>Testing Location</i>
Scanning electron microscopy (SEM)	Surface	>0.001	Laboratory
Dye penetrant	Surface	0.025–0.25	Laboratory/in-field
Ultrasonics	Subsurface	>0.050	Laboratory/in-field
Optical microscopy	Surface	0.1–0.5	Laboratory
Visual inspection	Surface	>0.1	Laboratory/in-field
Acoustic emission	Surface/subsurface	>0.1	Laboratory/in-field
Radiography (x-ray/gamma ray)	Subsurface	>2% of specimen thickness	Laboratory/in-field

واحد من أهم الأمثلة لاستخدام NDT هو في اكتشاف الشقوق **cracks** والتسريب **leaks** في جدران خطوط أنابيب البترول في المناطق البعيدة. وعادة ما يستخدم الموجات فوق صوتية **Ultrasonic** باتصال مع تقنية الروبوت **robotic** الذي يمكن أن يسافر مسافات طويلة داخل خط الأنابيب.

الفصل الرابع فشل الكلال Fatigue failure

مقدمة: Introduction

الكلال احد أساليب الفشل يحدث للبنية الخاضعة لاجهادات ديناميكية ومترددة (مثل الكباري والطائرات وأجزاء الماكينات)، وتحت هذه الظروف من المحتمل أن يحدث الفشل عند مستوى إجهاد اقل بكثير من متانة الشد (أو حتى متانة الخضوع) في حالة الحمل الاستاتيكي.

المصطلح كلال (التعب) يستخدم لان هذا النوع الفشل عادة ما يحدث بعد فترة طويلة من الإجهاد المتكرر **repeated stress** أو دورات الانفعال **strain cycling**.

يعد الكلال اكبر أسباب الفشل في الأجزاء المعدنية (يمثل تقريبا 90% من كل فشل المعادن)، واللدائن والمواد السيراميك (ماعدا الزجاج) أيضا تتعرض لهذا النوع من الفشل.

الفشل الكلالي ذو طبيعة قصفيه حتى في المعادن التي في العادة تكون المطيلية لان التشوه اللدن إذا صاحبه يكون قليل جدا.

الفشل الكلالي ماكرومأساوي ويحدث فجأة بدون تحذير. العملية تتم بواسطة نشوء شقوق ثم نموها وعادة سطح الكسر يكون عمودي على اتجاه الإجهاد المسلط.

الاجهادات الدورية: Cyclic stresses

الإجهادات الكلال يمكن أن تكون محوريه **axial** (شد-ضغط) أو ثني **flexural** (انحناء **bending**) أو لي **torsional** (متلولب **twisting**). وعموما هنالك احتمال ثلاثة أشكال مختلفة للعلاقة بين الإجهاد المتردد والزمن **fluctuating stress-time**:

الاحتمال الأول: يسمى بدورة الإجهاد المعكوسة **reversed stress cycle** ويمثل بالمنحنى الجيبي المنتظم في الشكل (1) حيث أن سعة (نطاق) الإجهاد **amplitude** متماتلة حول متوسط مستوى إجهاد يساوي الصفر، مثال لذلك أن يتعاقب الإجهاد بين أقصى إجهاد شد (σ_{max}) وأدنى إجهاد ضغط (σ_{min}) يكونان متساويان في المقدار.

الاحتمال الثاني: يسمى بدورة الإجهاد المتكررة **repeated stress cycle** ويمثل بالمنحنى الجيبي المنتظم في الشكل (b1) حيث أن القيمتان القصوى والدنيا للإجهاد تتماثلان حول متوسط إجهاد (σ_m) بعيد نسبيا من مستوى الإجهاد صفر .
 الاحتمال الثالث: يمثل بالمنحنى في الشكل (c1) حيث أن مستوى الإجهاد يتغير عشوائيا من حيث السعة **amplitude** والتردد **frequency** .
 كما موضح بالشكل (b1) هنالك عدد من المقاييس المستخدمة لوصف تقلب دورة الإجهاد:

الإجهاد متوسط: (mean stress (σ_m))

هو القيمة التي يتراوح حولها نطاق الإجهاد ويحسب بمتوسط أقصى وأدنى إجهاد في الدورة.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (1)$$

مدى الإجهاد: (range of stress (σ_r))

الفرق بين أقصى قيمة للإجهاد وأدنى قيمة للإجهاد.

$$\sigma_r = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (2)$$

سعة (نطاق) الإجهاد: (stress amplitude (σ_a))

نصف مدى الإجهاد.

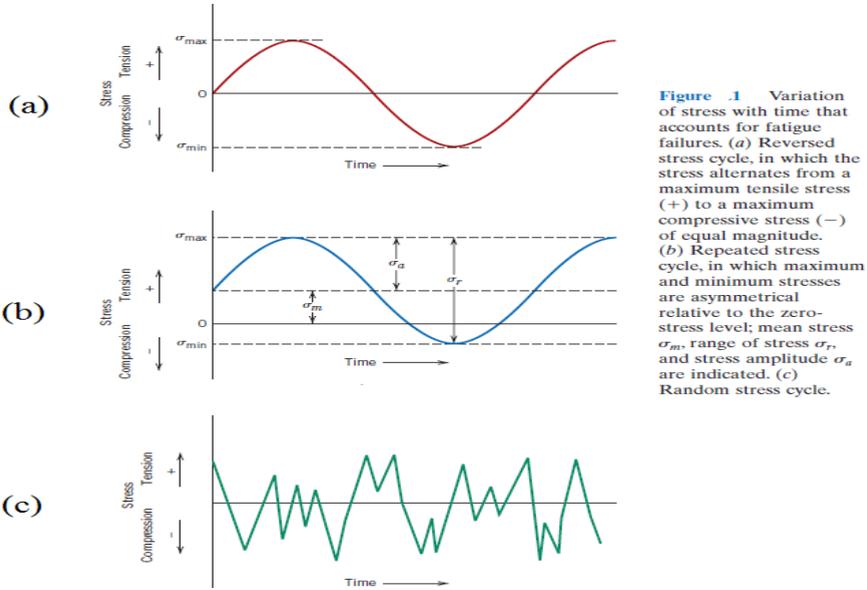
$$\sigma_a = \frac{\sigma_r}{2} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (3)$$

نسبة الإجهاد: (stress ratio (R))

النسبة بين ادنى وأقصى إجهاد

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (4)$$

اصطلاحا إجهاد الشد يأخذ إشارة موجبة (+) وإجهاد الضغط يأخذ إشارة سالبة (-)، مثلا لدورة الإجهاد المعكوسة **reversed stress cycle** قيمة نسبة الإجهاد $R = -1$.



الشكل (1) تغير الإجهاد مع الزمن في حالات الفشل الكلاسي

منحنى الكلال S-N: The S-N curve

مثل بقية الخواص الميكانيكية خواص الكلال للمواد يمكن تحديدها باختبارات محاكاة في المختبر. أجهزة الاختبار لا بد من تصميمها لتطابق بقدر الإمكان ظروف الخدمة (مستوى الإجهاد، تردد الزمن، نمط الإجهاد، etc...). الشكل (2) يوضح رسم تخطيطي لجهاز اختبار الكلال الأكثر استخداما وفيه إجهاد الضغط وإجهاد الشد يسلطان على العينة أثناء دورانها وانحناءها.

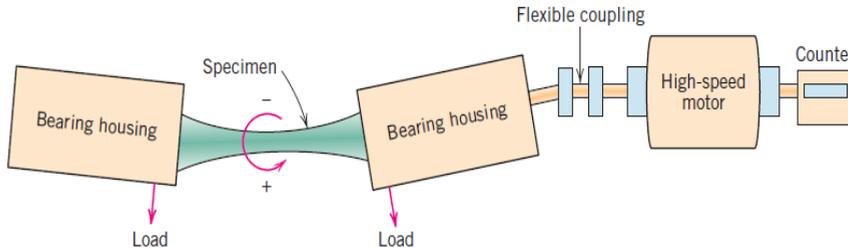


Figure 2 Schematic diagram of fatigue-testing apparatus for making rotating-bending tests.

الشكل (2) جهاز اختبار الكلال

اختبارات الكلال:

١. تبدأ سلسلة الاختبارات بتعريض عينة لدورة إجهاد عند إجهاد أقصى (σ_{max}) كبير نسبياً (عادةً ثلثي متانة الشد الاستاتيكي) وتحسب عدد الدورات حتى حدوث فشل.
٢. تكرر العملية على مجموعة من العينات الأخرى بإنقاص تدريجي لقيمة الإجهاد الأقصى.
٣. توضع البيانات في رسم بياني محوره الراسي الإجهاد S ومحوره الأفقي لوجارثم عدد الدورات حتى حدوث الفشل N . قيمة الإجهاد S عادة ما تؤخذ كسعة (نطاق) الإجهاد (σ_a) stress amplitude (المعادلة 3).

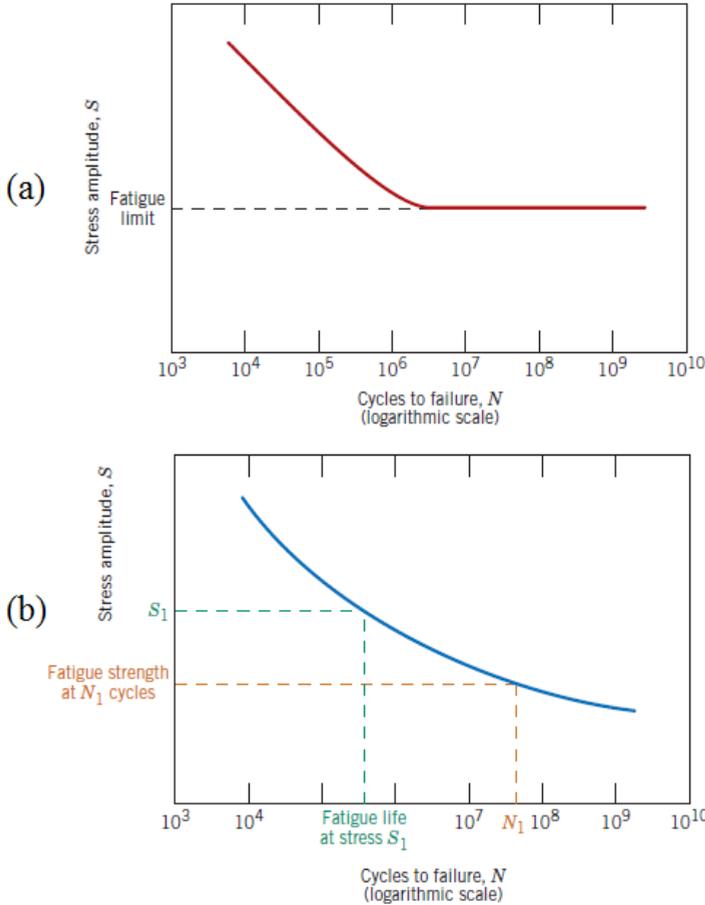


Figure 3 Stress amplitude (S) versus logarithm of the number of cycles to fatigue failure (N) for (a) a material that displays a fatigue limit and (b) a material that does not display a fatigue limit.

الشكل (٣) رسم بياني لسعة (نطاق) الإجهاد (S) ولوجارثم عدد الدورات حتى حدوث الفشل (N)

الشكل (٣) يمثل نوعين مميزين من السلوك لمنحنيات S-N يمكن ملاحظتهما. بصورة عامة الرسمان البيانيان يشيران إلى انه كلما كانت قيمة الإجهاد كبيرة كلما كانت قلت عدد الدورات التي تثبتها (تبقاها) المادة حتى الفشل.

حد الكلال: **fatigue limit**

لبعض السبائك الحديدية وسبائك التتانيوم المنحني S-N (الشكل ٣a) يصبح أفقيا عند قيم N العالية أو عند مستوى إجهاد محدد يسمى حد الكلال **fatigue limit** وفي بعض الأحيان يسمى حد الاحتمال (البقاء) **endurance limit**. أسفل حد الكلال لا يحدث الفشل، وهو يمثل اكبر قيمة لتردد الإجهاد لا تسبب الفشل لعدد لا نهائي من الدورات.

حد الكلال لعدد من سبائك الفولاذ يتراوح بين 60% - 35% من متانة الشد.

متانة الكلال: **fatigue strength**

معظم السبائك الغير حديدية (مثلا الألمنيوم والنحاس والمغنسيوم) ليس لها حد كلال، والمنحني S-N لها يواصل الميلان لأسفل بزيادة قيمة N (الشكل ٣b)، لذلك يحدث الفشل الكلافي في النهاية بصرف النظر عن قيمة الإجهاد. لهذه المواد استجابة الكلال تعين كمتانة الكلال **fatigue strength** والتي تعرف بأنها مستوى الإجهاد الذي يحدث عنده الفشل لعدد معين من الدورات (مثلا 10⁷ دورة).

عمر الكلال: **fatigue life**

عمر الكلال N_f **fatigue life** مقياس مهم يصف سلوك الكلال للمواد ويعرف بأنه عدد الدورات التي تسبب الفشل عند مستوى إجهاد معين (الشكل ٣b).

تبعثر بيانات الكلال: **fatigue data-scatter**

لسوء الحظ دائما ما يوجد هنالك تبعثر **scatter** مقدر في بيانات الكلال حيث يكون هنالك اختلاف في قياس قيمة N لعدد من العينات التي تم اختبارها عند نفس مستوى الإجهاد. وهذا الاختلاف قد يقود إلى شك كبير في التصميم عندما يأخذ في الاعتبار عمر الكلال **fatigue life** و/أو حد الكلال **fatigue limit** و/أو متانة الكلال **fatigue strength**. التبعثر يحدث كنتيجة لحساسية الكلال لعدد من متغيرات اختبار المادة والتي من الصعب التحكم فيها بدقة. وهذه المتغيرات تضم:

- تصنيع العينات **specimen fabrication**
- تجهيز السطح **surface preparation**

• ضبط العينة في الجهاز specimen alignment in apparatus

• متوسط الإجهاد mean stress

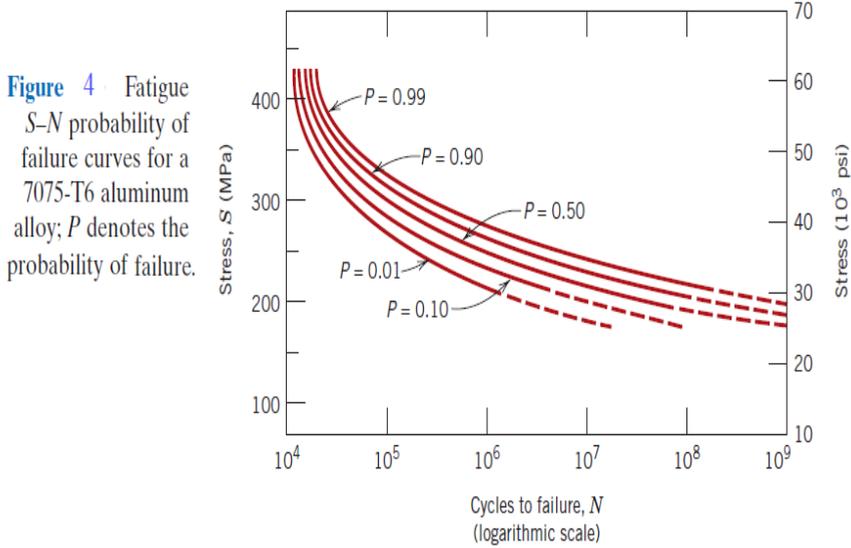
• عدد مرات تكرار الاختبار test frequency

• المتغيرات المتعلقة بخواص المادة metallurgical variables

مشكلة التبعر يتم معالجتها إحصائيا بعمل أكثر من اختبار لمستوى الإجهاد المعين ثم رسم منحنى الكلال S-N من خلال القيمة المتوسطة لبيانات النقاط.

احتمال الفشل الكلالي: - probability of fatigue failure

تم تطوير مجموعة من التقنيات الإحصائية لتعيين عمر الكلال وحد الكلال في شكل احتمالات. إحدى الطرق المناسبة هي تمثيل البيانات المعالجة بسلسلة من منحنيات الاحتمال الثابتة (عدد منها مرسوم في الشكل (٤)). قيمة P المصاحبة لكل منحنى تمثل احتمال الفشل. مثلا عند إجهاد 200 MPa ($30,000 \text{ psi}$) نتوقع 1% من العينات تفشل عند حوالي 10^6 دورة و 50% تفشل عند حوالي 2×10^7 دورة وهكذا.



الشكل (٤) منحنيات الاحتمال الثابتة

سلوك الكلال: fatigue Behaviors

سلوك الكلال الممثل في الشكلين (a_3 & b_3) يمكن تصنيفه إلى مجالين:

المجال الأول: مصاحب للحمل العالي نسبيا ولا ينتج انفعال مرن elastic

deformation فقط لكن انفعال لدن plastic deformation أيضا أثناء أي دورة

بالتالي عمر الكلال قصير نسبيا. هذا المجال يسمى كلال الدورات المنخفضة -low cycle fatigue ويحدث عند اقل من 10^4 إلى 10^5 دورة تقريبا.

المجال الثاني: مصاحب لمستويات الإجهاد المنخفضة والتي يكون فيها التشوه مرنا كليا ينتج عمر كلال أطول، وهذا يسمى كلال الدورات العالية high-cycle fatigue نسبة للعدد الكبير من الدورات المطلوبة لحدوث الفشل. كلال الدورات العالية يكون مصاحب لعمر كلال اكبر من 10^4 إلى 10^5 دورة تقريبا.

نشوء الشق ونموه: Crack initiation and propagation

عملية الفشل الكلالي تتميز بثلاث خطوات بارزات:

(١) نشوء الشق crack initiation، والتي فيها تتكون شقوق صغيرة عند

بعض النقاط ذات التركيز العالي للإجهاد.

(٢) نمو الشق crack propagation، والتي خلالها يتقدم الشق تزايديا مع

كل دورة إجهاد.

(٣) الفشل النهائي final failure، والذي يحدث سريع جدا مجرد أن يصل

تقدم الشق الطول الحرج.

الشقوق المصاحبة للفشل الكلالي دائما تقريبا ما تنشأ في سطح الجزء عند نقاط تركيز الإجهاد والتي تتضمن الخدوش في السطح surface scratches والالتفافات الحادة sharp fillets ومجاري الخواير keyways والقلاووظ threads و البروز (الانبعاث) dents. بالإضافة لذلك التحميل الدوري ينتج فجوات discontinuities مجهرية في السطح حيث تحدث انزلاقات slips صغيرة في كل مرة يتغير فيها اتجاه الإجهاد ولا ترجع هذه الانخلاعات dislocations إلى مكانها في كل مرة كليا، وهذا يؤدي إلى حدوث بروز في جزء من السطح ودخول في جزء آخر منه، وتعمل أماكن الدخول كروافع إجهاد وبالتالي مواقع لنشوء الشق.

منطقة سطح الكسر المشكلة أثناء خطوة نمو الشق تتميز بنوعين من العلامات

تسميان:

• علامات الشاطئ الرملي beachmarks

• والحزوز (الثلمات) striations،

وهاتين الهيئتين تشيران إلى موقع مقدمة الشق عند نقطة من الزمن وتظهر كسلسلة تلال شبه دائرية متحدة المركز تتمدد مبتعدة من مكان (أماكن) نشوء الشق.

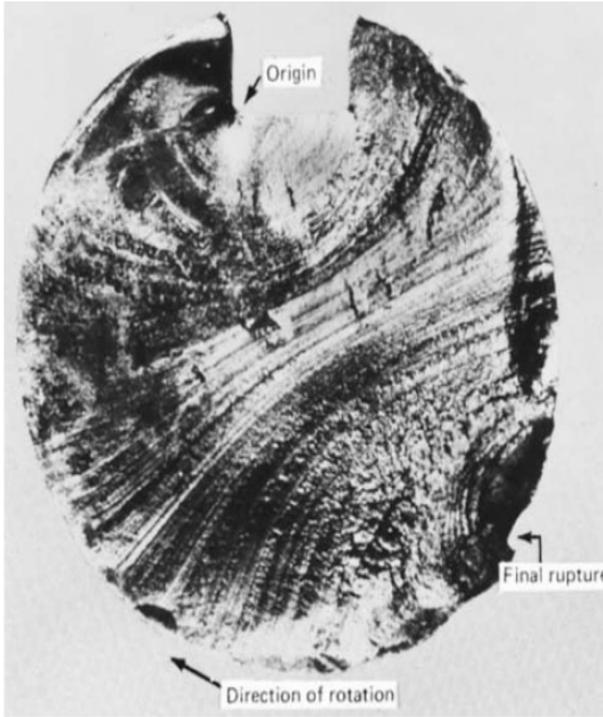


Figure 5 Fracture surface of a rotating steel shaft that experienced fatigue failure. Beachmark ridges are visible in the photograph.

الشكل (٥) علامات الشاطئ الرملي beachmarks

علامات الشاطئ الرملي (تسمى أيضا علامات الدلو المحاري clamshell marks) كما ترى بالعين المجردة موضحة بالشكل (٥). وتوجد هذه العلامات في الأجزاء التي تعرضت لتقطيع في التشغيل interruptions أثناء مرحلة نمو الشق (مثلا الماكينة عملت فقط خلال ساعات الوردية العادية)، وكل حزمة علامات تمثل فترة من الزمن حدث فيها نمو للشق.

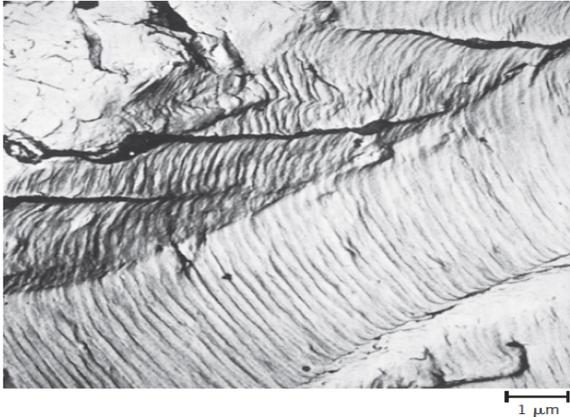


Figure 6 Transmission electron fractograph showing fatigue striations in aluminum.

الشكل (٦) حزوز (ثلمات) الكلال fatigue striations

من ناحية أخرى فان حزوز (ثلمات) الكلال **fatigue striations** تكون مجهرية الحجم (صغيره جدا) كما يوضحها الشكل (٦). والحز (الثلمة) الواحد يمثل المسافة التي تقطعها مقدمة الشق خلال دورة تحميل واحدة، وعرض الحز يعتمد على (يزيد) على زيادة مدى الإجهاد **stress range**.

إلى هذه النقطة يجب التأكيد بأنه بالرغم من أن كل من علامات الشاطئ الرملي والحزوز هيئتان لسطح الكسر الكلالي لهما نفس المظهر، بالرغم من ذلك مختلفتان في النشوء والحجم (قد يكون هنالك آلاف الحزوز في علامة الشاطئ الرملي الواحدة).

دائما سبب الفشل يستنتج بعد اختبار وفحص سطح الفشل، ووجود علامات الشاطئ الرملي و/أو الحزوز على سطح الكسر يؤكد أن سبب الفشل هو الكلال. مع ذلك غياب احدهما أو الاثنان معا لا يبعد الكلال كسبب للفشل.

تعليق أخير يتعلق بأسطح الفشل الكلالي: علامات الشاطئ الرملي والحزوز لا تظهران في المواضع التي يحدث فيها الفشل السريع **rapid failure** والذي قد يكون مطيلي (به تشوه لدن) أو قصفي (ليس به تشوه لدن). منطقة الفشل يمكن ملاحظتها في الشكل (٧).

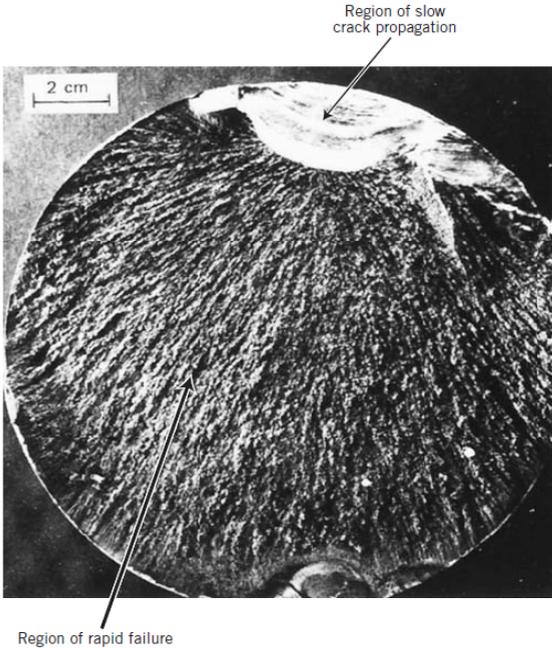


Figure 7 Fatigue failure surface. A crack formed at the top edge. The smooth region also near the top corresponds to the area over which the crack propagated slowly. Rapid failure occurred over the area having a dull and fibrous texture (the largest area).

الشكل (٧) مظهر الفشل السريع **rapid failure**

العوامل التي تؤثر على عمر الكلال: Factors that affecting fatigue life

كما ذكر سابقا فان سلوك الكلال للمواد الهندسية حساس جدا لعدد من المتغيرات. بعض هذه العوامل تتضمن مستوى الإجهاد المتوسط **mean stress** و التصميم الهندسي للشكل **geometrical design** ومظهر السطح **surface effects** ومتغيرات خواص المادة **metallurgical variables** والبيئة المحيطة **environment**.

هذا الجزء مكرس لمناقشة هذه العوامل بالإضافة للتدابير التي يمكن اتخاذها لتحسين مقاومة الكلال **fatigue resistance** لمكونات البنية الهندسية.

الإجهاد المتوسط: **mean stress**

اعتماد عمر الكلال على نطاق (سعة) الإجهاد تمثل في منحنى الكلال **S-N**. هذه البيانات أخذت لإجهاد متوسط ثابت σ_m غالبا ما يكون لحالة دورة الإجهاد المعكوسة ($\sigma_m = 0$). الإجهاد المتوسط أيضا يؤثر على عمر الكلال. هذا التأثير يوضحه الشكل (18.8) الذي يمثل سلسلة من منحنيات الكلال **S-N** كل منها عند لإجهاد متوسط σ_m مختلف. كما يلاحظ زيادة مستوى الإجهاد المتوسط تقود لنقصان عمر الكلال.

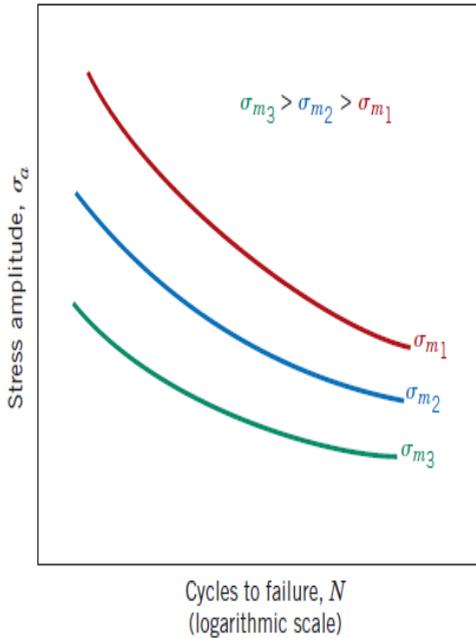


Figure 8 · Demonstration of the influence of mean stress σ_m on **S-N** fatigue behavior.

الشكل (٨) تأثير الإجهاد المتوسط على عمر الكلال

مظهر السطح: surface effects

لمعظم حالات التحميل الإجهاد الأقصى للجزء أو البنية يحدث عند السطح، بالتالي معظم الشقوق التي تقود للفشل الكلاسيكي تبدأ في السطح خاصة في أماكن تركيز الإجهاد. لذلك يلاحظ أن عمر الكلال على وجه الخصوص حساس لحالة وهيئة سطح الجزء.

عوامل متعددة تؤثر على مقاومة الكلال والتدبير المناسب لأي منها يقود لتحسين مقاومة الكلال. هذا يتضمن مؤشرات التصميم والمعالجات السطحية المختلفة.

عوامل التصميم: design factors

تصميم الجزء له تأثير كبير على صفات الكلال، فأي حز أو فجوة في الشكل يمكن أن تعمل كرافعة إجهاد **stress raiser** وموقع لنشوء شقوق الكلال. هيئات التصميم المرفوضة تتضمن الأخاديد والثقوب ومجاري الخواير والقلاووظ. كلما كانت الفجوة حادة (نصف قطر الانحناء صغير) كلما زاد قابليتها لتركيز الإجهاد. احتمال الفشل الكلاسيكي يقل بتفادي عدم الانتظام في البنية بقدر الإمكان أو بعمل تعديل في التصميم يتم فيه التخلص من التغير المفاجئ الذي يقود للأركان الحادة. مثلاً عمل التفاف مستدير **rounded fillet** بنصف قطر انحناء كبير عند النقطة التي يكون فيها تغير في قطر عمود الدوران (الشكل ٩).

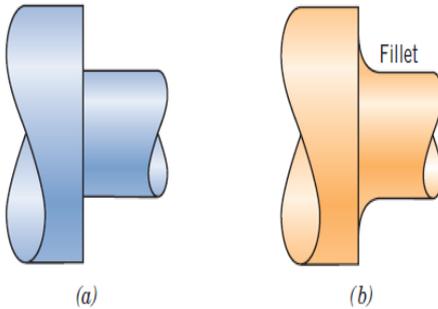


Figure 9 Demonstration of how design can reduce stress amplification. (a) Poor design: sharp corner. (b) Good design: fatigue lifetime improved by incorporating rounded fillet into a rotating shaft at the point where there is a change in diameter.

الشكل (٩) تأثير التصميم على عمر الكلال

المعالجات السطحية: surface treatments

الصقل polishing:

خلال عمليات التشغيل ونتيجة لحركة أداة القطع تظهر على سطح الشغلة خدوش وأخاديد صغيرة تؤدي إلى الحد من عمر الكلال. ومن الملاحظ أن تحسين التشطيب السطحي بالصقل **polishing** يزيد عمر الكلال زيادة مؤثرة.

الطرق بالطلقات :shot peening

واحدة من أكثر الطرق المؤثرة على زيادة عمر الكلال هي تعريض الطبقات الخارجية الرفيعة لاجهادات ضغط متبقية **residual compressive stresses** . بالتالي إجهاد الشد السطحي للمصادر الخارجية يلطف جزئيا وتنقص قيمته بإجهاد الضغط المتبقي. يكون التأثير النهائي هو تقليل احتمال تكون الشقوق بسبب ذلك تقليل الفشل الكلال.

اجهادات الضغط المتبقية تدخل للسطح ميكانيكيا للمعادن الطرية بعمل تشوه لدن موضعي لمناطق معينة في السطح الخارجي، وتجاريا تتم بطريقة تسمى الطرق بالطلقات **shot peening** وفيها كرات صغير قاسية (الطلقات) لها قطر يتراوح بين **0.1 to 1.0mm** يتم إسقاطها بسرعات عالية على السطح المراد معالجته والنتيجة تكون تشوه يحدث اجهادات ضغط لعمق بين ربع إلى نصف قطر الطلقة **shot**. تأثير عملية الطرق بالطلقات على سلوك الكلال للفولاذ موضح بالشكل (١٠).

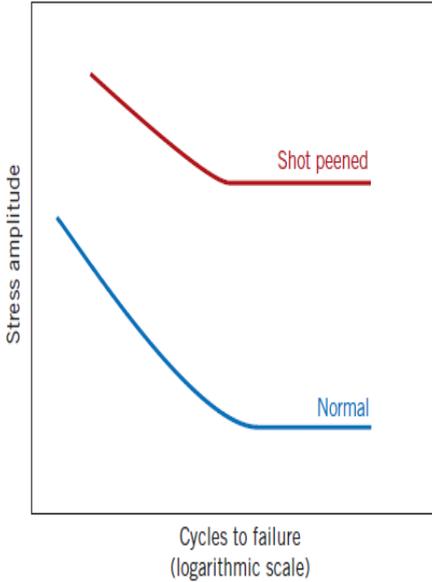


Figure 10 Schematic *S-N* fatigue curves for normal and shot-peened steel.

الشكل (١٠) تأثير عملية الطرق بالطلقات على سلوك الكلال

التقسية السطحية :case hardening

التقسية السطحية تقنية يتم بها زيادة كل من صلادة السطح وعمر الكلال لسبائك الفولاذ وتتم بعملية الكربنة أو عملية النتردة حيث يتم تعريض الجزء لجو غني بالكربون أو النتروجين عند درجات حرارة مرتفعة. يتغلغل الكربون أو

النيتروجين للطبقة الخارجية للسطح بالانتشار الذري **atomic diffusion** ليصبح السطح ولعمق حوالي 1mm أكثر صلادة من القلب الداخلي للمنتج. التحسين في خواص الكلال تنتج من زيادة الصلادة في السطح بالإضافة إلى تكوين اجهادات الضغط المتبقية المصاحبة لعمليات الكربنة التبردة. الزيادة في صلادة السطح موضحة بالشكل (١١) حيث الشكلان الماسيات المظلمان يمثلان الأثر لجهاز الصلادة ويلاحظ أن الأثر الأعلى الواقع في الطبقة الكربنة اصغر من الواقع القلب.

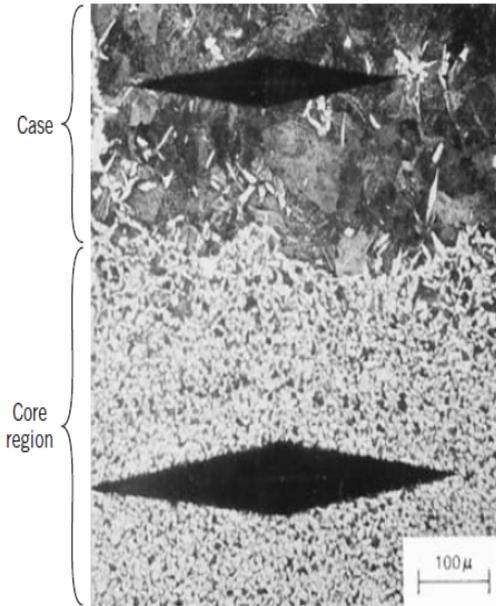


Figure 11 Photomicrograph showing both core (bottom) and carburized outer case (top) regions of a case-hardened steel. The case is harder, as attested by the smaller microhardness indentation. 100X.

الشكل (١١) تأثير عملية التقسية السطحية على سلوك الكلال

تأثيرات البيئة: Environmental effects

عوامل البيئة أيضا تؤثر على سلوك الكلال للمواد الهندسية، وفي هذا الجزء تتم مناقشة مختصره لنوعين من الأشكال البيئية للفشل الكلاي هما الكلال الحراري **thermal fatigue** و كلال التآكل **corrosion fatigue**.

الكلال الحراري thermal fatigue:

عادة ما يحدث الكلال الحراري عند درجات الحرارة المرتفعة بواسطة التذبذب في الإجهادات الحرارية **thermal stresses** ولا تكون هناك حوجة لوجود الإجهادات الميكانيكية من مصدر خارجي. مصدر هذه الإجهادات الحرارية هو الكبت (التقييد) للتمدد و/أو الانكماش الذي عادة ما يحدث للجزء نتيجة للتغير في درجة الحرارة.

مقدار الإجهاد الحراري الناتج من التغير في درجة الحرارة ΔT يعتمد على:

- معامل التمدد الحراري للمادة α_l coefficient of thermal expansion
- معامل المرونة E. modulus of elasticity

$$\sigma = \alpha_l E \Delta T \quad (5)$$

الإجهادات الحرارية لا ترتفع إذا كان الكبت (التقييد) الميكانيكي غائبا، لذلك واحد من أوضح الطرق لمنع هذا النوع من الكلال هو التخلص من مصدر الكبت (التقييد) أو تقليله بقدر الإمكان بذلك يسمح بتغيير غير مقيد في المقاسات بتغيير درجة الحرارة.

(الكبت الميكانيكي ينتج من اللحام، البرشام، الربط بالمسامير...)

أيضا يمكن منع أو التقليل من الكلال الحراري باختيار مواد ذات خواص

فيزيائية مناسبة α_l .

كلال التآكل :corrosion fatigue

البيئات الأكلة **corrosive environments** لها تأثير مؤذ وتنتج أعمار كلال قصيرة. حتى الجو المحيط الطبيعي يؤثر على سلوك الكلال لبعض المواد.

ال فشل الذي يحدث بفعل الإجهاد الدوري المتزامن مع الهجوم الكيميائي يسمى بكلال التآكل. نتيجة للتفاعل الكيميائي بين المادة والبيئة تنشأ حفر صغيرة يمكن أن تعمل كنقاط لتمركز الإجهاد بالتالي مواقع لنواة الشق. بالإضافة لذلك معدل نمو الشق يزيد كنتيجة للبيئة الأكلة.

طبيعة دورات الإجهاد تؤثر على سلوك الكلال، مثلا تكرار تخفيض تطبيق الحمل يقود لأن يكون الشق مفتوح لفترات طويلة ومعرض للبيئة مما يقلل من عمر الكلال. هنالك عدد من الطرق لمنع والوقاية من كلال التآكل (تناقش بالتفصيل في محاضرة فشل التآكل) منها:

- عمل طبقات واقية للسطح. **Protective surface coatings**
- اختيار مادة أكثر مقاومة للتآكل. **Select a more corrosion-resistant material**
- اتخاذ إجراء لتقليل احتمال الفشل الكلالي مثلا بتقليل مستوى إجهاد الشد المسلط بعمل اجهدات ضغط متبقية في سطح الجزء (كما مضح سابقا).

الفصل الخامس

فشل الزحف

Creep failure

مقدمة: Introduction

المواد الهندسية في أحوال كثيرة توضع في الخدمة عند درجات حرارة مرتفعة وتعرض لاجهادات ميكانيكية ثابتة (مثل التوربينات الدوارة التي تلاقي اجهادات طرد مركزي في المحركات النفاثة والمولدات البخارية ، وخطوط أنابيب البخار ذات الضغط العالي).

التشوه تحت هذه الظروف يسمى الزحف **creep** ويمكن تعريفه بالتشوه الدائم **permanent deformation** للمواد والذي يعتمد على الزمن **time-dependent** عندما تتعرض لإجهاد أو حمل ثابت **constant load or stress** عند درجة حرارة مرتفعة **elevated temperature** .

الزحف عادة ظاهرة غير مرغوبة وكثيرا ما تعد عامل يحد من عمر الجزء. يظهر الزحف في كل أنواع المواد الهندسية، وللمعادن تصبح مهم فقط عند درجات حرارة تقريبا اكبر من $0.4T_m$ (T_m = درجة حرارة الانصهار المطلقة).

آليات (طرق) سلوك الزحف: Creep behavior mechanisms

من المعروف أن الزحف تشوه مستمر يحدث إذا تعرضت المادة الهندسية إلى تسليط إجهاد أو حمل ثابت تحت درجة حرارة ثابتة ويحدث التشوه الزحفي حتى إذا كان الإجهاد اقل من إجهاد الخضوع.

لتفسير سلوك الزحف (كيف يحدث الزحف) تم اقتراح مجموعة من الآليات (الطرق) النظرية. وهما (حسب الإجهاد ودرجة الحرارة) طريقتان هما:

١. الزحف عن طرق حركة الانخلاعات. **Dislocation movement creep**

٢. الزحف عن طريق الانتشار. **Diffusion creep**

الزحف عن طرق حركة الانخلاعات: **Dislocation movement creep**

حركة الانخلاعات تلعب دورا كبيرا ومهما أثناء التشوه الزحفي ويتم التشوه الزحفي عن طريق حركة الانخلاعات عند درجات حرارة اعلي من $0.4T_m$ في ثلاث مراحل:

١. مرحلة تكوين الانخلاعات.
٢. مرحلة حركة الانخلاعات.
٣. مرحلة إعادة تنظيم الانخلاعات أثناء عملية زوال الانفعالات.

عند بداية الزحف ونتيجة لتسليط الإجهاد تتحرك الانخلاعات بسرعة كبيرة طالما أن المعدن خالي من اصلااد الانفعال **strain hardening**. هذه السرعة في حركة الانخلاعات تؤدي إلى حدوث تشوه أو انفعال بصورة كبيرة ولكن بعد فترة قصيرة تتراكم هذه الانخلاعات خلف حواجز (مثل الحدود الحبيبية) تحول دون حركتها مما يؤدي إلى زيادة اصلااد الانفعال داخل المعدن وبالتالي يقل معدل الانفعال تدريجياً. يستمر تراكم الانخلاعات خلف هذه الحواجز حتى يكون الإجهاد الداخلي الناتج من تراكمها كافي لمنع تكون وتحريك انخلاعات جديدة من المنبع.

نتيجة للطاقة التنشيطية للزحف Q_c الناتجة عن درجة الحرارة تتمكن الانخلاعات القريبة من مقدمة الحاجز من التسلق إلى سطح انزلاق آخر أو جديد تنحدر عليه، كذلك يمكن أن يحدث فناء أو زوال لانخلاع إذا قابل انخلاع آخر ذو علامة أو إشارة مضادة لإشارته. وبالتالي يقل تراكم الانخلاعات خلف الحاجز ومن ثم اصلااد الانفعال مما يسمح بحركة جديدة للانخلاعات من المنبع ومواصلة حدوث التشوه (الانفعال) الزحفي.

بعد فترة طويلة من الزمن يحدث تعادل بين عملية اصلااد الانفعال **strain hardening** الناتج عن تراكم الانخلاعات وبين عملية الاستعادة **recovery** (التي تحدث التلين) والناتجة عن زوال الانفعالات باجتياز الانخلاعات للحواجز في هذه المرحلة يتواصل التشوه بصورة منتظمة ومستقرة .

باستمرار تتعرض المادة للتشوه يحدث فيها تخرص عند منطقة من طول العينة، يعمل الإجهاد بصورة كبيرة في منطقة التخرص مما يؤدي لزيادة معدل الزحف وبالتالي زيادة التخرص ونتيجة لهذا التشوه المستمر في منطقة التخرص يرتفع اصلااد الانفعال بصورة كبيرة ويؤدي إلى حدوث شق صغير في منطقة الحدود الحبيبية أو داخل حبيبات المادة. تتراكم الإجهادات في مقدمة الشق أو الشقوق مما يؤدي إلى نموها حتى تصل إلى الطول الحرج وبالتالي تقود إلى الفشل والتمزق.

الزحف عن طريق الانتشار: **Diffusion creep**

عموما طريقة الزحف بالانتشار من الطرق المهيمنة لإحداث التشوه عندما تكون درجة الحرارة حوالي 80% من درجة حرارة انصهار المادة ($0.8T_m$).

يحدث التشوه الزحفي عن طريق الانتشار نتيجة لتبادل الخلوات والفجوات بين المنابع والمصببات تحت تأثير درجات الحرارة العالية و عندما يكون الإجهاد قليل وغير كافي لحركة الانخلاعات..

في هذه الطريقة يحدث التشوه اللدن نتيجة لحركة الذرات نسبة لوجود عيوب نقطية (خلوات أو فجوات) في البنية البلورية أو في الحدود الحبيبية وتعتبر الحدود الحبيبية من أهم مصادر الخلوات وكذلك من أهم مصباتها طالما أن توزيع وتركيز الفجوات ليس متساوي في الشبكة البلورية للمادة فان حركة الفجوات واختفائها يتم تحت تأثير طاقة زحف تنشيطية مساوية لطاقة الانتشار ذري.

Creep behavior tests: اختبار سلوك الزحف:

اختبار الزحف النموذجي يتوقف على تعريض عينة لإجهاد أو حمل ثابت مع المحافظة على درجة الحرارة ثابتة، ويقاس التشوه أو الانفعال ويرسم بيانيا كدالة في الزمن المنقضي.

معظم الاختبارات من نوع الحمل الثابت التي تنتج معلومات ذات طبيعة هندسية. اختبارات الإجهاد الثابت تستخدم لتعطي فهم أفضل لآليات الزحف. الشكل (١) يوضح تخطيط بياني نموذجي لسلوك زحف عند الحمل الثابت للمعادن.

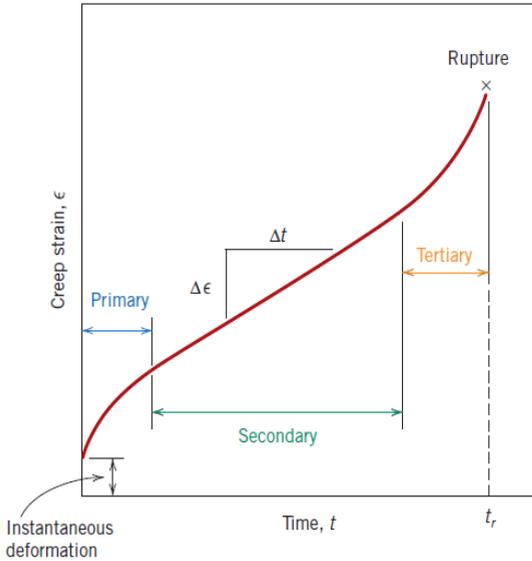


Figure 1 Typical creep curve of strain versus time at constant load and constant elevated temperature. The minimum creep rate $\Delta\epsilon/\Delta t$ is the slope of the linear segment in the secondary region. Rupture lifetime t_r is the total time to rupture.

الشكل (١) لسلوك زحف عند الحمل الثابت للمعادن.

عند تطبيق الحمل وقبل حدوث الزحف يحدث تشوه فوري (لحظي) **instantaneous deformation** ويكون مرناً كلياً **totally elastic**.

منحنى الزحف الناتج يتكون من ثلاث مناطق كل منها لها هيئة انفعال-زمن مميزة:
المنطقة الأولى: الزحف الابتدائي **primary creep** يحدث أولاً ويمثل بمعدل زحف يتناقص باستمرار لأن ميل المنحنى يتقلص مع الزمن والتشوه يصبح أكثر صعوبة كلما انضغبت المادة. يرجع ذلك لتعرض المادة لزيادة في مقاومة الزحف **creep resistance** أو تصليد (تقسية) الانفعال **strain hardening**.

المنطقة الثانية: الزحف الثانوي **secondary creep** في بعض الأحيان يسمى الزحف المستقر **steady-state creep**. معدل الزحف ثابت والمنحنى يصبح خطي وهي عادة مرحلة الزحف الأطول بقاءً. ثبات معدل الزحف يفسر على أساس التوازن بين العمليتين المتعاكستين تصليد (تقسية) الانفعال **strain hardening** والاستعادة **recovery**. الاستعادة هي العملية التي عندها المادة تصبح طرية وتحفظ بقدرتها للتعرض للتشوه.

المنطقة الأخيرة: الزحف الثالث **tertiary creep** ويكون فيه تعجيل في معدل الزحف حتى حدوث الفشل النهائي الذي عادة ما يسمى تمزق **rupture**. وينتج التمزق من تغيرات في البنية المجهرية للمادة و/أو خواصها، (مثلاً انفصال الحدود الحبيبية وتكون شقوق داخلية وتجاويف وفراغات). أيضاً نتيجة لحمل الشد قد يحدث التخصر عند نقطة معينة في منطقة التشوه. كل هذا يقود إلى تناقص في مساحة المقطع المؤثرة ولتزايد في معدل الانفعال.

لمعظم المواد الهندسية خواص الزحف لا تعتمد عملياً على اتجاه التحميل. وللمواد المعدنية معظم اختبارات الزحف تجرى عند حمل شد في محور واحد باستخدام عينات لها نفس شكل عينات اختبار الشد.

من ناحية أخرى فإن اختبارات الضغط في محور واحد تكون أكثر ملائمة للمواد القصفيه لأنه يعتبر تدبر أفضل لاختبار خواص الزحف الفعلية نسبة لعدم وجود تكبير للإجهاد ونمو للشقوق كما في تحميل الشد. وعينات اختبار الضغط عادة ما تكون في شكل اسطوانات مستقيمة لها نسبة طول إلى القطر يقع في المدى بين 2 إلى 4.

أهم الخواص التي يمكن الحصول عليها من اختبارات الزحف:

A. معدل زحف الحالة المستقرة **steady-state creep rate**

B. العمر حتى التمزق (عمر الزحف) **rupture lifetime**

A. معدل زحف الحالة المستقرة: **steady-state creep rate**

المؤشر الأكثر أهمية الذي يستخرج من اختبار الزحف هو ميل المنحنى في منطقة الزحف الثانوي ($\Delta\epsilon/\Delta t$) والذي عادة ما يسمى اقل معدل زحف **minimum creep rate** أو معدل زحف الحالة المستقرة **steady-state creep rate**.

معدل زحف الحالة المستقرة ($\dot{\epsilon}_s$) يدخل في اعتبارات التصميم الهندسي للتطبيقات ذات العمر الطويل مثل مكونات محطات الطاقة النووية والتي تجدرول للتشغيل عدة عقود وعندما يكون الفشل أو الانفعال الكبير ليس خيار.

B. العمر حتى التمزق (عمر الزحف): **rupture lifetime**

للعديد من حالات الزحف ذات العمر القصير نسبياً (مثلاً ريش توربين الطائرة العسكرية وفوهات محرك الصاروخ) فإن الزمن حتى التمزق **time to rupture** أو عمر التمزق **rupture lifetime** يسيطر على اعتبارات التصميم.

لتحديد العمر حتى التمزق (t_r) يجب أن تجرى اختبارات الزحف حتى النقطة التي يحدث عندها الفشل، وفي هذه الحالة تسمى اختبارات تمزق الزحف **creep**

rupture tests. المعرفة بخواص الزحف ($\dot{\epsilon}_s$ و t_r) لمادة معينة يسمح لمهندس التصميم بالتحقق من ملائمتها للتطبيق المحدد.

تأثيرات الإجهاد ودرجة الحرارة: **Stress and temperature effects**

كل من درجة الحرارة ومستوى الإجهاد المسلط يؤثران على خواص الزحف (الشكل ٢).

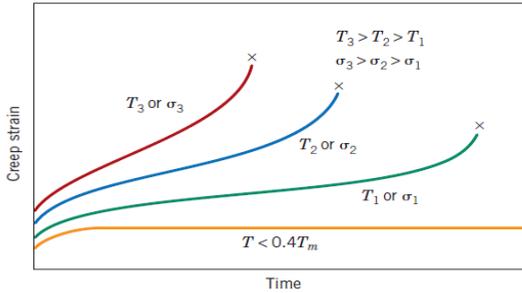


Figure 2 Influence of stress σ and temperature T on creep behavior.

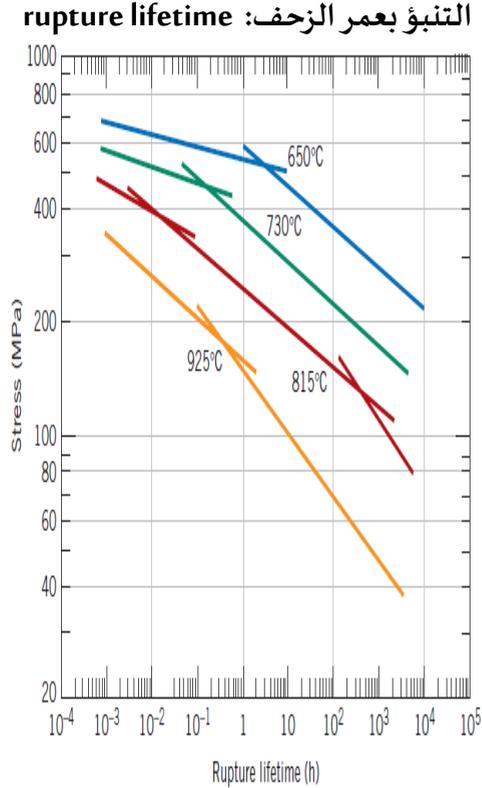
الشكل (٢) تأثير الإجهاد ودرجة الحرارة على خواص الزحف

عند درجة حرارة اقل من $0.4T_m$ وبعد التشوه الاستهلاكي (اللحظي) الانفعال لا يعتمد على الزمن.

بزيادة الإجهاد أو درجة الحرارة يلاحظ الآتي:

١. يزداد الانفعال اللحظي **instantaneous strain** والذي يحدث عند بداية تطبيق الإجهاد.
٢. يزداد معدل زحف الحالة المستقرة **steady-state creep rate**.
٣. يتناقص العمر حتى التمزق (**rupture lifetime**) (عمر الزحف).

Figure 3 Stress (logarithmic scale) versus rupture lifetime (logarithmic scale) for an S-590 alloy at four temperatures. [The composition (in wt%) of S-590 is as follows: 20.0 Cr, 19.4 Ni, 19.3 Co, 4.0 W, 4.0 Nb, 3.8 Mo, 1.35 Mn, 0.43 C, and the balance Fe.]



الشكل (٣) العلاقة بين لوغاريتم الإجهاد ولوغاريتم عمر التمزق عند درجات حرارة ثابتة

نتائج اختبارات تمزق الزحف **creep rupture tests** دائما ما تعرض كرسم بياني يوضح العلاقة بين لوغاريتم الإجهاد ولوغاريتم عمر التمزق عند درجات حرارة ثابتة. الشكل (19.3) يوضح مجموعة من العلاقات الخطية التي توجد عند درجات حرارة مختلفة للسبيكة S-590.

لبعض السبائك وعند مجالات إجهاد عالية نسبيا يلاحظ أن المنحنيات تكون غير خطية.

علاقة معدل زحف الحالة المستقرة بالإجهاد:

تم تطوير علاقة تجريبية يوضح فيها معدل زحف الحالة المستقرة ($\dot{\epsilon}_s$) كدالة في الإجهاد.

علاقة معدل زحف الحالة المستقرة بالإجهاد هي:

$$\dot{\epsilon}_s = K_1 \sigma^n \quad (1)$$

حيث أن:

σ : الإجهاد.

K_1 : ثابت يعتمد على المادة الهندسية.

n : أس الإجهاد.

رسم العلاقة بين لوغاريتم معدل زحف الحالة المستقرة ($\dot{\epsilon}_s$) ولوغاريتم الإجهاد σ ينتج خط مستقيم ميله يساوي n كما موضح في الشكل (٤) والذي فيه خط مستقيم واحد أو خطين رسما لكل درجة حرارة.

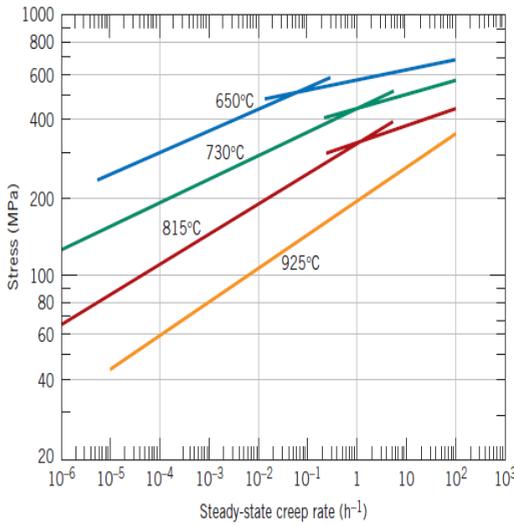


Figure 4 . Stress (logarithmic scale) versus steady-state creep rate (logarithmic scale) for an S-590 alloy at four temperatures.

الشكل (٤) العلاقة بين لوغاريتم معدل زحف الحالة المستقرة ($\dot{\epsilon}_s$) ولوغاريتم الإجهاد σ لسبيكة معينة

علاقة معدل زحف الحالة المستقرة بالإجهاد ودرجة الحرارة معا:

تم تطوير علاقة تجريبية يوضح فيها معدل زحف الحالة المستقرة ($\dot{\epsilon}_s$) كدالة في الإجهاد ودرجة الحرارة معا:

$$\dot{\epsilon}_s = K_2 \sigma^n \exp \left(- \frac{Q_c}{RT} \right) \quad (2)$$

حيث أن:

K_2 و Q_c : ثابتان يعتمدان على المادة الهندسية (Q_c تسمى طاقة التنشيط للزحف).

T : درجة الحرارة المطلقة (بالكلفين)

R : ثابت الغاز (قيمه تساوي 8.314)

طرق استقراء البيانات: Data extrapolation methods

الحاجة دائما ما ترتفع لبيانات الزحف الهندسية والتي تجمع تجريبا من اختبارات معملية قياسية تستغرق فترات طويلة (سنوات عديدة).

احد الحلول لهذه المشكلة يتضمن إجراء اختبارات الزحف و/أو اختبارات تمزق الزحف **creep rupture tests** لفترات زمنية قصيرة عند درجات حرارة عالية تتجاوز تلك المطلوبة، وعند مستوى إجهاد عالية بعد ذلك يتم عمل الاستقراء المناسب لحالة الجزء الهندسي أثناء الخدمة.

إحدى طرق الاستقراء الشائعة الاستخدام تستعمل دلالة لارسون - ميلر **Larson-Miller parameter** والتي تعرف كالتالي:

$$T(C + \log t_r) \quad (3)$$

حيث أن:

C : ثابت (عادة ما يساوي 20).

T : درجة الحرارة بالكلفين.

t_r : عمر التمزق بالساعات.

عمر التمزق (الزحف) للمادة المقاس عند مستوى إجهاد محدد يتغير مع درجة الحرارة (علاقة عكسية) لذلك قيمة دلالة لارسون - ميلر تظل ثابتة.

ترسم البيانات في منحني يمثل العلاقة بين لوغاريتم الإجهاد ومؤشر لارسون - ميلر كما في الشكل (٥).

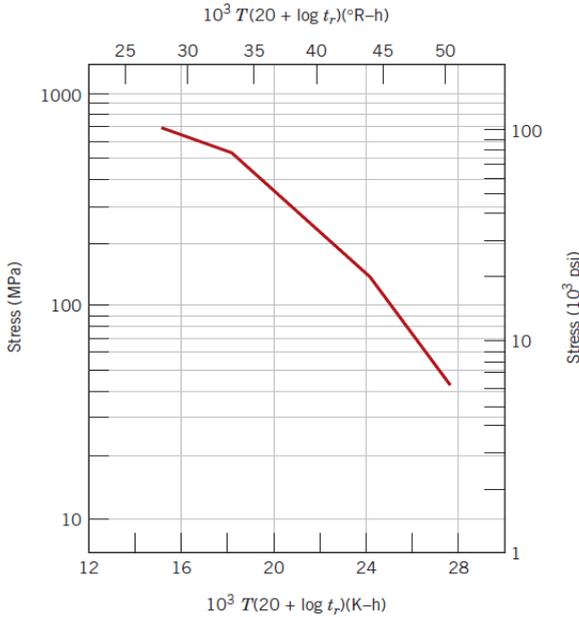


Figure 5 Logarithm of stress versus the Larson–Miller parameter for an S-590 alloy.

الشكل (٥) العلاقة بين لوغاريتم الإجهاد ومؤشر لارسون-ميلر

DESIGN EXAMPLE

Rupture Lifetime Prediction

Using the Larson–Miller data for the S-590 alloy shown in Figure 19.5 predict the time to rupture for a component that is subjected to a stress of 140 MPa (20,000 psi) at 800°C (1073 K).

Solution

From Figure 19.5 at 140 MPa (20,000 psi) the value of the Larson–Miller parameter is 24.0×10^3 , for T in K and t_r in h; therefore,

$$\begin{aligned} 24.0 \times 10^3 &= T(20 + \log t_r) \\ &= 1073(20 + \log t_r) \end{aligned}$$

and, solving for the time,

$$\begin{aligned} 22.37 &= 20 + \log t_r \\ t_r &= 233 \text{ h (9.7 days)} \end{aligned}$$

السبائك المستخدمة لدرجات الحرارة العالية:

Alloys for high-temperature use

هناك عدد من العوامل تؤثر على خواص الزحف للمعادن تشمل:

١. درجة حرارة الانصهار **Melting temperature**.

٢. ومعامل المرونة **Modulus of elasticity**.

٣. حجم الحبيبات **Grains size**.

بصورة عامة كلما كانت درجة حرارة الانصهار مرتفعة ومعامل المرونة كبير وحجم الحبيبات كبير كلما كانت مقاومة المادة للزحف أفضل.

بالنسبة لحجم الحبيبات كلما كان صغيرا هذا يعني انزلاق اكبر للحدود الحبيبية مما ينتج عنه معدل زحف عالي. وهذا التأثير يتعاكس مع تأثير حجم الحبيبات على السلوك الميكانيكي عند درجات الحرارة المنخفضة (مثلا زيادة كل من مقاومة الشد **strength** والقساوة **toughness**).

الفولاذ المقاوم للصدأ **stainless steels** والسبائك الخارقة **superalloys** تكون بصورة خاصة مقاومة للزحف وتستخدم كثيرا في التطبيقات التي تخدم عند درجة الحرارة العالية.

مقاومة الزحف لهذه السبائك تحسن بتكوين محاليل الصلبة **solid solution** وأطوار كيميائية المترسبة **precipitate phases** مما تقلل من حركة الانخلاعات وانزلاق الحدود الحبيبية. بالإضافة لذلك يتم استخدام تقنيات متقدمة، إحدى هذه التقنيات هي التجمد الاتجاهي **directional solidification** والتي تنتج إما حبيبات عالية الاستطالة **highly elongation grains** أو منتجات من بلورة واحدة **single-crystal component** كما في الشكل (٦).

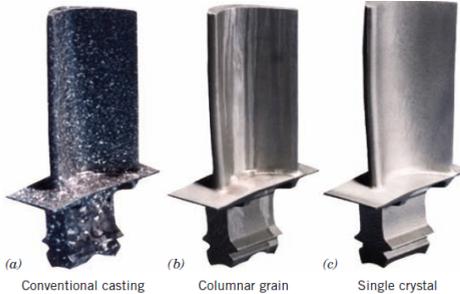


Figure 6 (a) Polycrystalline turbine blade that was produced by a conventional casting technique. High-temperature creep resistance is improved as a result of an oriented columnar grain structure (b) produced by a sophisticated directional solidification technique. Creep resistance is further enhanced when single-crystal blades (c) are used.

الشكل (٦) مقارنة بين استخدام السبائك التقليدية واستخدام التجمد الاتجاهي **directional solidification** لريشة توربين