الكلال (التعب)
Fatigue

مقدمه

الكلال هو الإنهيار المفاجئ (Sudden Failure) للعناصر الإنشائية المعرضة لأحمال متكررة (Repeated Loads) أثناء التشغيل بعد عديد من دورات التحميل (Cycles).

المنشآت التي تتعرض لأحمال Fatigue

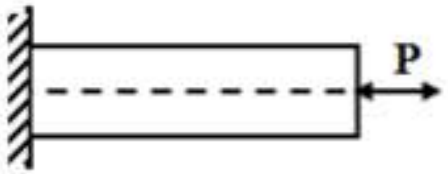
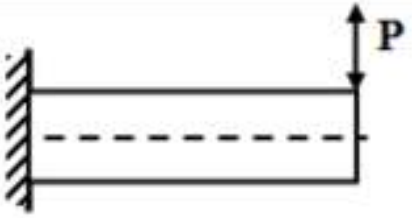
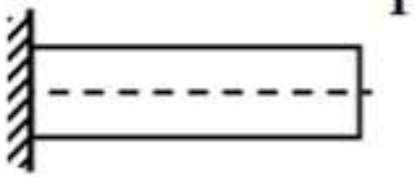
١- معدات حفر التربة ٢- اجنحة الطائرات ٣- قاطرات السكك الحديدية

مراحل الانهيار بسبب Fatigue :

1- Point defect 2- Small cracks 3- Stress concentration

4- Crack propagation نمو الشرخ 5- Sudden failure

Types of fatigue loading:

Axial load	Bending	Torsion
		
$\sigma_{max} = \frac{P_{max}}{A}$	$\sigma_{max} = \frac{M_{max}\ Y}{I}$	$\sigma_{max} = \frac{T_{max}\ r}{J}$
$\sigma_{min} = \frac{P_{min}}{A}$	$\sigma_{min} = \frac{M_{min}\ Y}{I}$	$\sigma_{min} = \frac{T_{min}\ r}{J}$

وموضوع الكلال ذو أهمية قصوى فى المجال الهندسى إذ يلزم للمنشآت الهندسية أن توفى الإشتراطات الثلاثة الآتية :

١- تؤدى عملها المطلوب Function

٢- تؤدى عملها بتكاليف معتدلة Cost

٣- أن يكون لها مدة تشغيل مناسبة Service Life

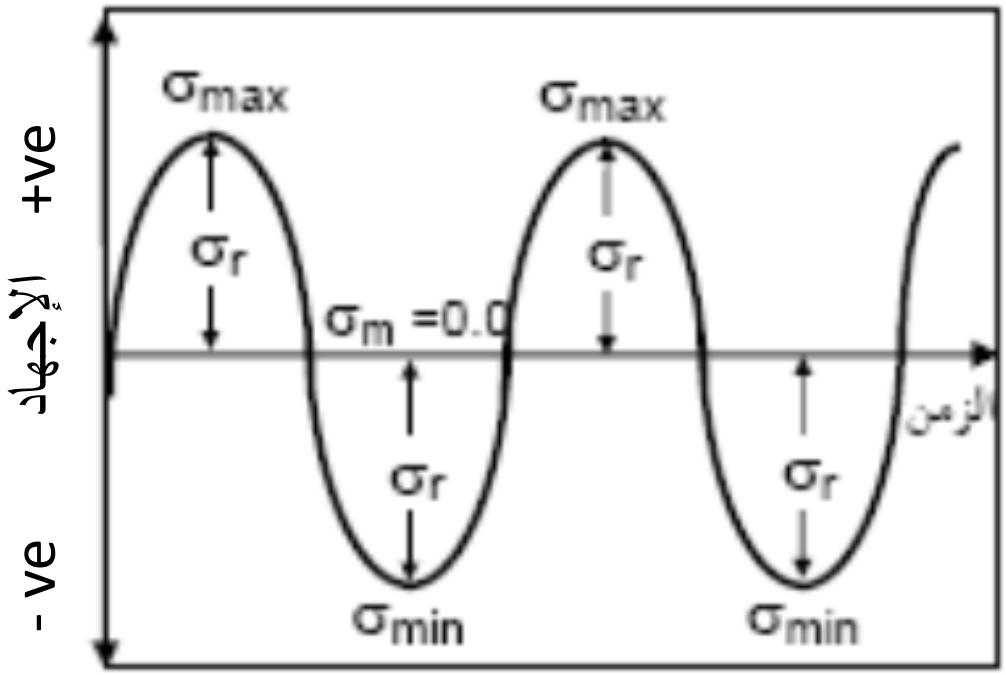
وغالبا فإن الذى يراعى عند التصميم هما الشرطين الأولين أما الشرط الثالث وهو مدة التشغيل المناسبة فيراعى بطرق تقريبية لأن معظم مهندسى التصميم ليسوا على درجة كافية من الدراية بفن التشغيل مع الزمن. ويعتبر التحميل المتكرر ذو أهمية كبيرة فى المجالات الهندسية إذ قد تتحمل المادة إجهاداً معيناً إذا كان التحميل إستاتيكياً ، بينما تنهار المادة بتأثير نفس الحمل إذا كان تكرارياً. كذلك فإن الإجهاد الأقصى المتكرر الذى تتحمله المادة دون حدوث الإنهيار هو أقل من الإجهاد الأقصى فى حالة التحميل الإستاتيكى لمرة واحدة. وفى حالة الأحمال المتكررة تتوقف خواص مقاومة المادة على مقدار الإجهادات المتكررة ونوعها وعلى عدد مرات تكرارها. والإجهادات المتكررة تؤدى إلى نتائج خطيرة فى المواد المعرضة لها. وتمثل الكسور بسبب الإجهادات المتكررة حوالى ٩٠% من أسباب الإنهيار فى أجزاء الآلات. وهذا النوع من الإجهادات يسبب الإنهيار على الرغم من أنه أقل من إجهاد حد المرونة. كذلك فإنه لايحدث فى المادة قبل إنهيارها نفس الظواهر العادية التى تحدث فى حالة التحميل الإستاتيكى مثل الخضوع أو التشكل اللدن ويكون الكسر من النوع القصف بينما المادة أصلاً مادة معدنية مطيلة ولذلك فإن الكسر يقع بصورة فجائية دون إنذار.

الأحمال المتكرره Repeated Loads

الحمل المتكرر هو الحمل الذى يسبب إجهاداً يتكرر عدد من الدورات ويأخذ إحدى الصور الموضحة فى الشكل (١) وهي:

١ - دوره معكوسه كليا

وفيها يتغير الإجهاد من قيمة قصوى فى الشد إلى قيمة قصوى فى الضغط.



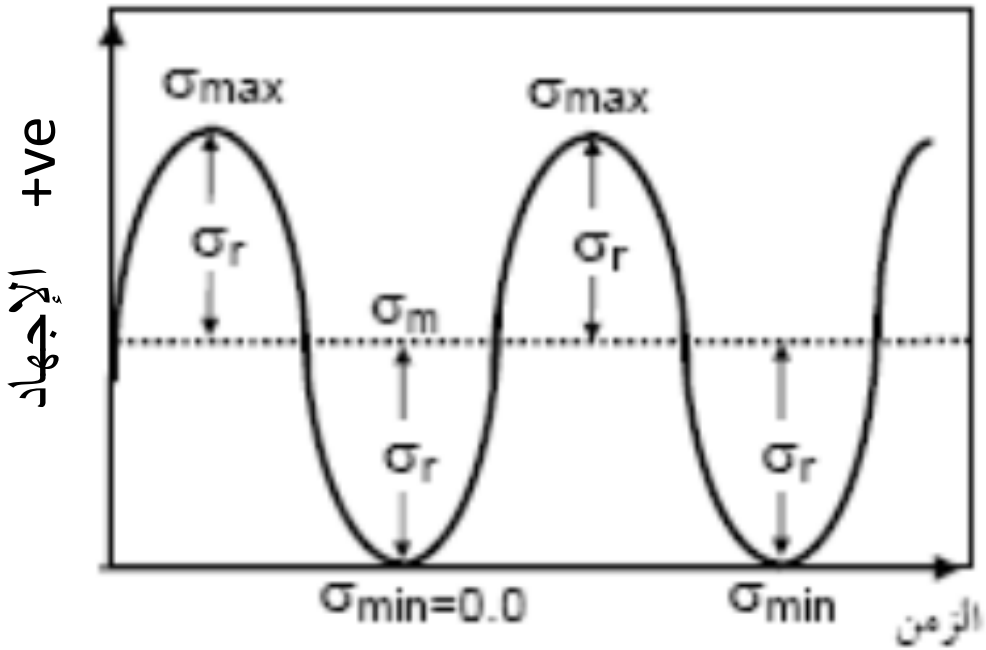
$$\sigma_{max} = -\sigma_{Min} = \sigma_r$$

$$\sigma_m = 0.0$$

2- دوره نابضه بين σ_{max} ، صفر

وفيها يتغير الإجهاد من قيمة قصوى فى الشد أو الضغط إلى الصفر.

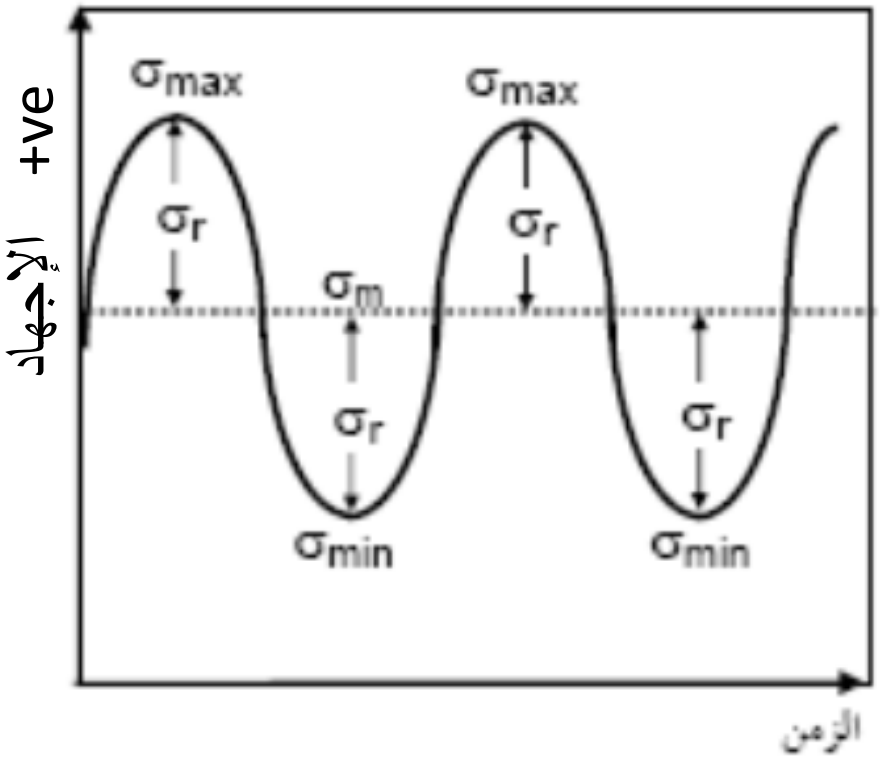
$$\sigma_m = \sigma_{max}/2, = \sigma_{min} = 0.0$$



$$\sigma_r = \sigma_m$$

3- دوره نابضه بين قيمتين σ_{max} ، σ_{min}

وفيها يتغير الإجهاد من قيمة قصوى فى الشد أو فى الضغط إلى قيمة أقل ولكنها أعلى من الصفر.



شكل (١) دورات التحميل المختلفه

$$\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min})/2$$

$$\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_m = \sigma_m - \sigma_{min}$$

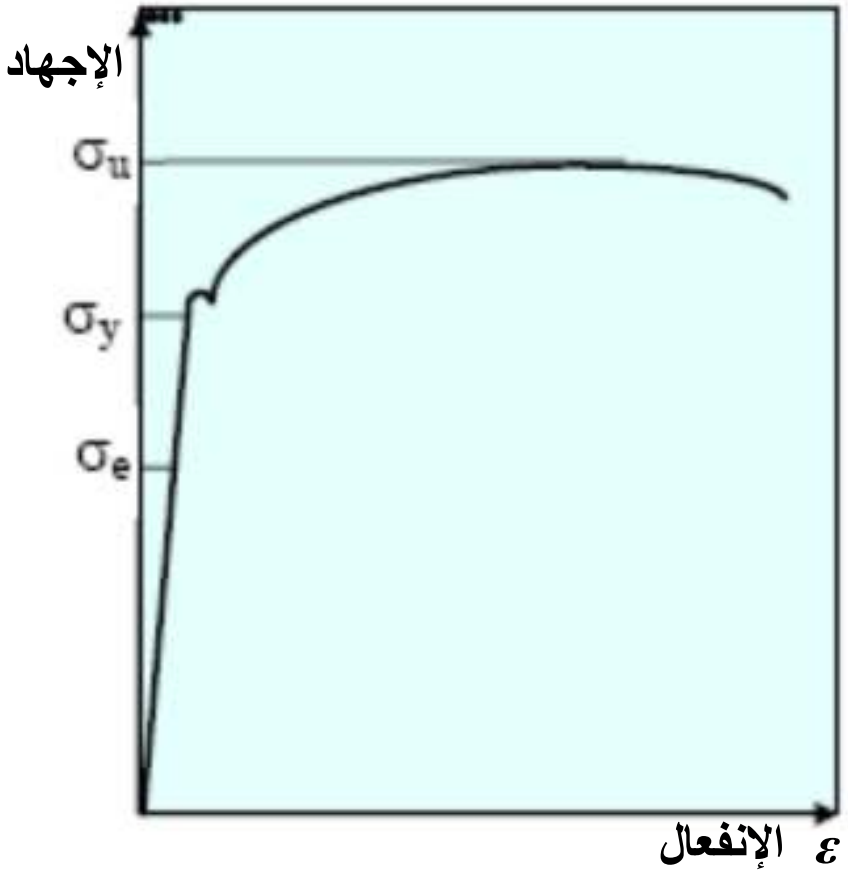
إذن فالإجهاد المتكرر عبارة عن إجهاد ثابت σ_m مضاف اليه إجهاد متغير σ_r

إجهاد حد الإحتمال Endurance Limit Stress

إجهاد حد الإحتمال أو حد الصمود σ_e هو أقصى إجهاد ذو مدى محدود ومعكوس كلياً يؤثر على المعدن بحيث يمكن أن يحدث معه عدد لانهائى من دورات التحميل بأحمال متكررة دون حدوث الإنهيار ويحدد معملياً.

وينبغى هنا أن نفرق بين خواص المعدن الداخلية (المقاومة) وبين الإجهادات الناشئة عن الأحمال الخارجية. فالخواص الميكانيكية للمعدن "الخواص الداخلية" هى σ_e , σ_y , σ_u كما في الشكل (٢) وهى التى تقسم على عامل الأمان. أما σ_r , σ_{min}, σ_{max} , σ_m فهى الإجهادات المؤثرة نتيجة الأحمال الخارجية ولاتقسم على عامل الأمان.

ويلاحظ أنه فى حالة التحميل الإستاتيكى فإن إجهاد التصميم هو إجهاد الخضوع σ_y أما فى حالة إذا كانت الدورة معكوسة كليا فإن الإجهاد الأقصى والأدنى هو σ_e أما فى حالة الإجهادات المتكررة والمتراوحة فإننا نحسب قيمة σ_{min}, σ_{max} من بيانى سميث أو غيره بحيث لا تزيد أى منهما عن σ_y.



شكل (٢) منحنى الإجهاد والإنفعال للحديد.

تعيين إجهاد حد الإحتمال معمليا Endurance Limit Stress

حد الإحتمال هو أقصى إجهاد ذو مدى محدود ومعكوس كلياً يؤثر على المعدن بحيث يمكن أن يحدث معه عدد لانهائى من دورات التحميل بأحمال متكررة دون حدوث الإنهيار ويمكن تحديده معملياً كالتالي.

اختبار منحنى الإجهاد وعدد الدورات S-N diagram

ويجرى هذا الإختبار على عدد من العينات المتشابهة والتى يناسب شكلها مكنة الإختبار ويتم كالآتى:

١- تعرض العينة الأولى لإجهاد متكرر كبير وتعين عدد الدورات التى تكسرها.

٢- تعرض العينة الثانية لإجهاد متكرر أقل من إجهاد العينة الأولى ويعين عدد الدورات التى تكسرها والذى يكون أكبر من العدد الذى كسر العينه الأولى.

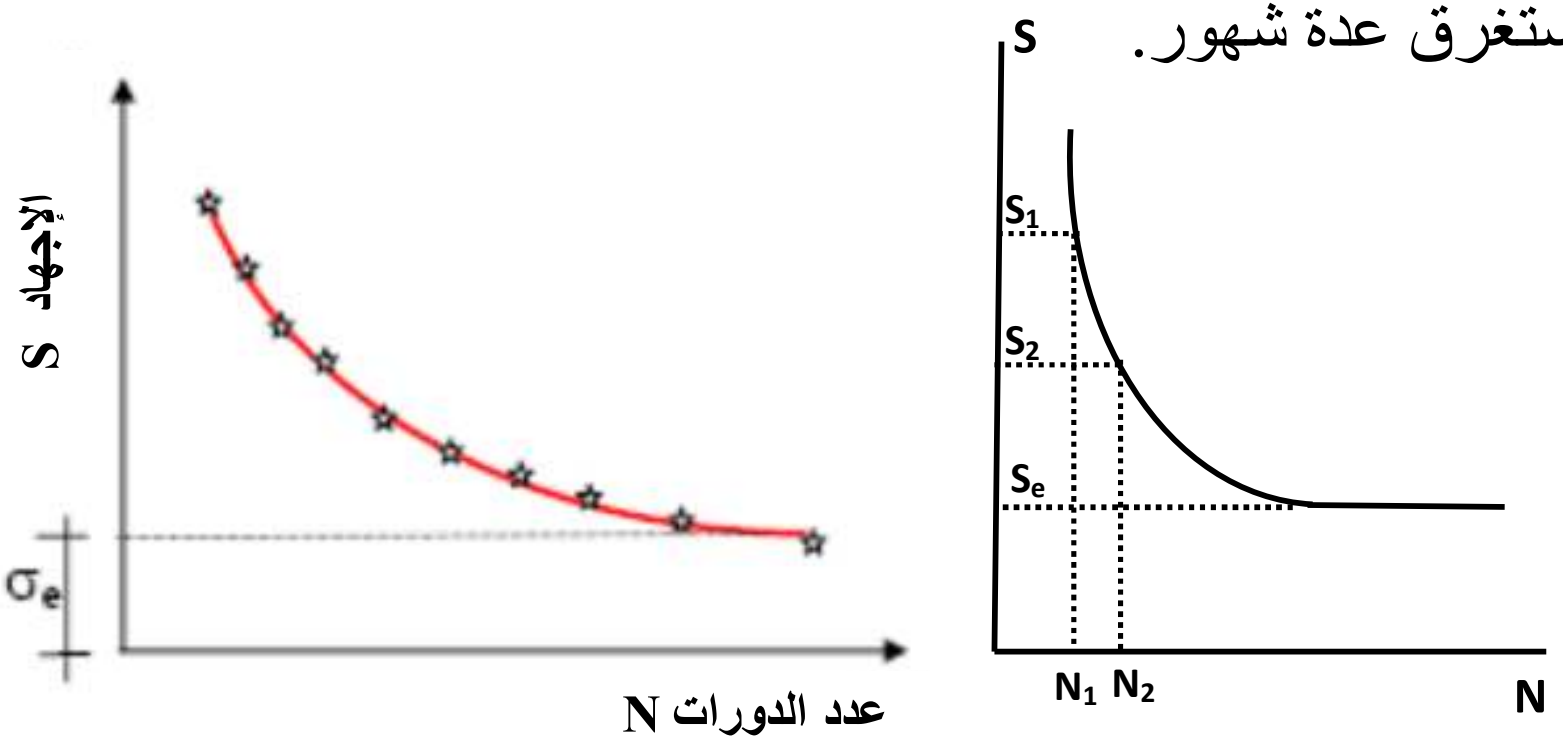
٣- يُكرر نفس العمل مع باقى العينات الأخرى وفى كل مرة يقلل قيمة الإجهاد المتكرر وتُعين عدد الدورات اللازمة لكسر العينة

٤- تُرسم العلاقة بين الإجهاد S وعدد الدورات N كما بالشكل (٣) ويعين حد الإحتمال.

من عيوب هذا الإختبار

أ - يحتاج إلى عدد كبير من العينات.

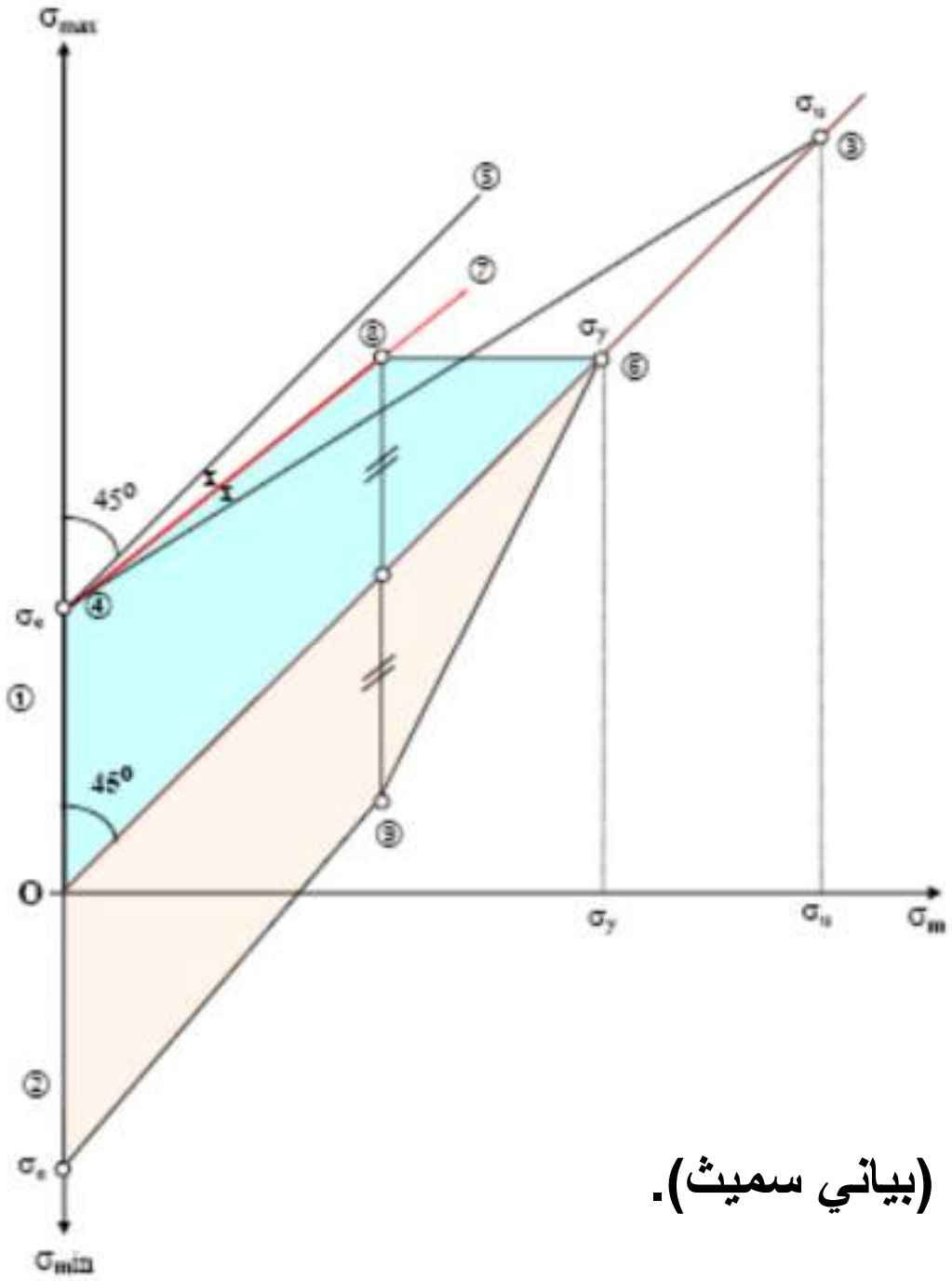
ب- كل عينة تحتاج إلى وقت كبير لإحداث الإنهيار بها مما قد يجعل هذا الإختبار يستغرق عدة شهور.



شكل (٣) منحنى الإجهاد وعدد الدورات.

بياني سميث Smith Diagram

بيانى سميث كما فى شكل (٤) يوضح العلاقة بين الإجهاد الأقصى **(σ_{max})** والإجهاد الأدنى **(σ_{min})** وبين الإجهاد المتوسط **(σ_m)** لأى دورة من دورات التحميل المتكرر ويطلق عليه ايضاً منحنى ***مقاومة الكلال***. الإحداثى الرأسى يمثل قيمتى σ_{max} , σ_{min} أما الإحداثى الأفقى فيمثل قيمة الإجهاد المتوسط **(σ_m)**. ولابد أن يكون **مقياس الرسم الأفقى هو نفس المقياس الرأسى**. ومن خصائص هذا المنحنى أنه إذا قطعه خط رأسى عند قيمة معينة للإجهاد المتوسط **(σ_m)** فإن نقطتى التقاطع مع خط بيانى الإجهاد الأقصى وخط بيانى الإجهاد الأدنى تمثلان حدود الإجهادات التى يمكن للمعدن تحملها دون تواجد خطر الإنهيار بالكلال. أما إذا خرجت قيمة الإجهاد الأقصى والأدنى لأى دورة عن هذا المنحنى فإن دورة هذا التحميل تكون غير آمنة وقد تسبب الإنهيار بالكلال. ويلاحظ أن الجزء من منحنى مقاومة الكلال الواقع بعد حد المرونة **(σ_y)** لا قيمة له من الناحية العملية حيث لا يسمح بأى إجهاد أن تزيد قيمته عن إجهاد الخضوع. ويمكن رسم منحنى سميث لمقاومة الكلال مع مراعاة الأمان المناسب لإستخدامه فى التصميم وذلك بإستخدام قيم الخواص الميكانيكية للشد والكلال مقسومه على عامل الأمان المناظر.



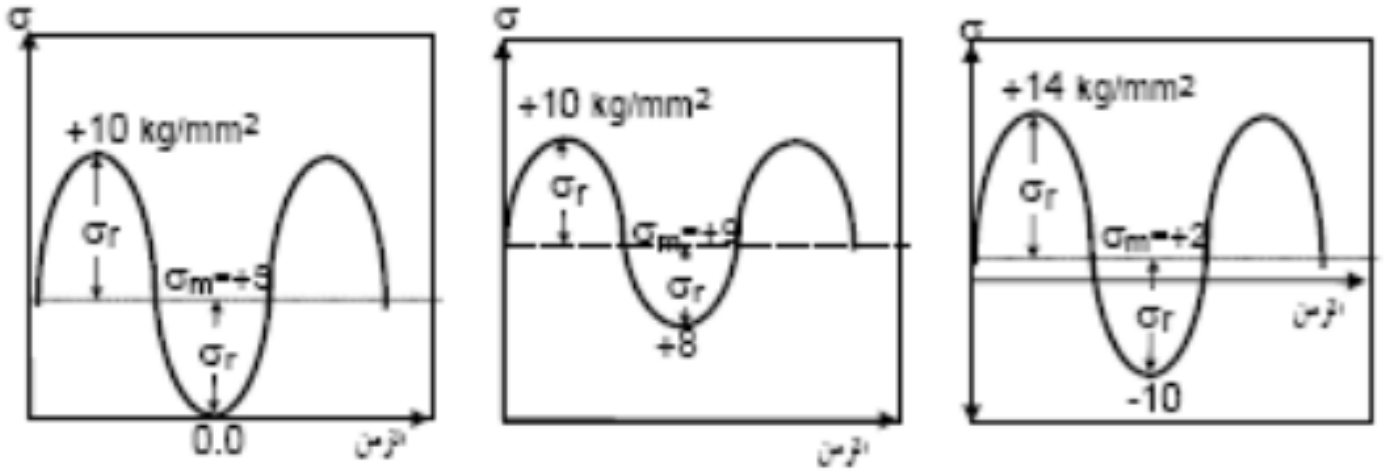
خطوات العمل:

١- توقع قيمة σ_e على المحور الرأسي فى الإتجاهين الموجب والسالب.
٢- ترسم خط على زاوية ٤٥ درجة من نقطة الأصل (O) وتوقع عليه النقطتين (σ_u ،σ_u) ، (σ_y ،σ_y) فنحصل على النقط 3 ، 6 على الترتيب.
٣- تصل النقطة 3 بإحداثى σ_e على المحور الرأسي الموجب (النقطة 4).
٤- ترسم من النقطة (4) خط على زاوية ٤٥ درجة فنحصل على النقطة (5).
٥- تنصف الزاوية المحصورة بين الخط 3-4 والخط 4-5 فنحصل على النقطة 7.
٦- ترسم من النقطة 6 خط أفقى فيقطع الخط 4-7 فى نقطة 8.
٧- ترسم خط رأسى من النقطة 8 حتى الخط O-6-3 وتأخذ مسافة مساوية لهذا الخط إلى أسفل فنحصل على النقطة (9).
٨- فيكون المضلع 6-9-(-σ_e)-O-4-8-6 مثلاً لبياني سميث.

شكل (٤) منحنى مقاومة الكلال (بياني سميث).

مثال :

أجرى تحليلا تجريبى للإجهادات بجزء من كوبرى معدنى معرض لحمل متكرر وكان الإجهاد الأقصى والأدنى لمواضع مختلفة طبقاً لدورات التحميل الآتية:



النقطه (أ) **النقطه (ب)** **النقطه (ج)**

فإذا كانت مقاومة الشد لمعدن الكوبرى =٤٠كج/مم^{٢} وإجهاد الخضوع= ٢٤ كج/مم^{٢} وحد الإحتمال = ١٨كج/مم^{٢} ـ عامل الأمان للشد والخضوع = ٢ وعامل الأمان لحد الإحتمال = ٣. بين ما إذا كانت الإجهادات فى الموضع أ ، ب ، ج فى حدود الأمان بالنسبة للإنهيار بالكلال

المعادلات الوضعيه لتحديد الإجهاد الأقصى والأدنى

يعين حد الإحتمال للمعدن σ_e على أساس الإختبار بإستخدام دورة إجهاد معكوسة كلياً ولذلك يعتبر حد الإحتمال هو الإجهاد الأقصى والأدنى المسموح به.

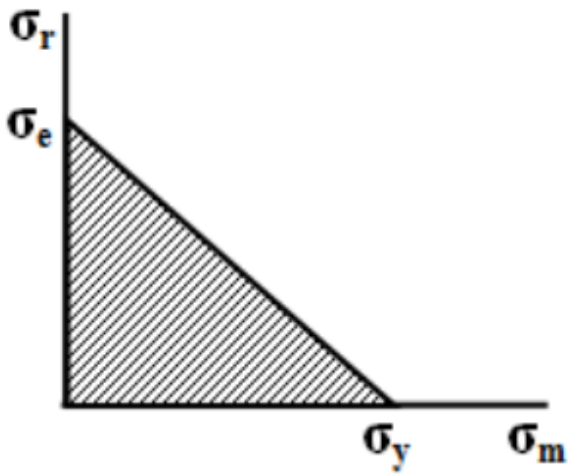
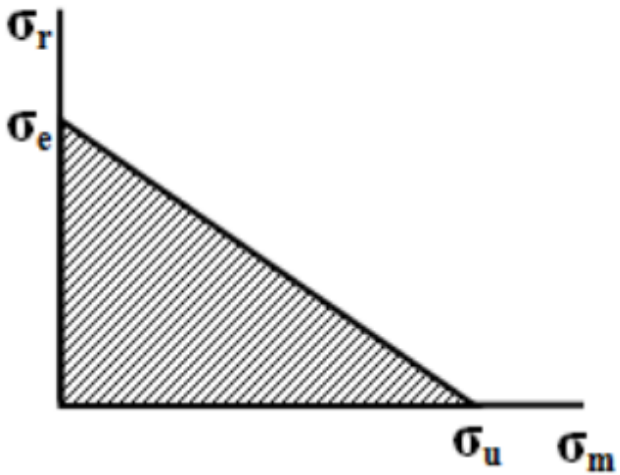
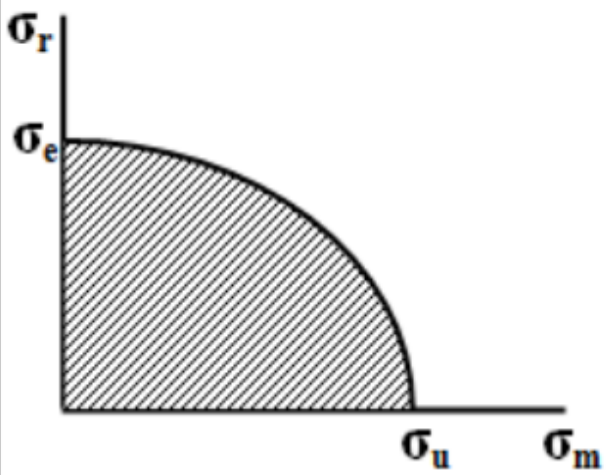
أما إذا كانت دورة الإجهاد غير معكوسة كلياً أى أن هناك قيمة للإجهاد المتوسط σ_m فإن حد الإحتمال لا يعبر عن الإجهاد الأقصى والأدنى ويلزم لذلك تحديد قيم الإجهادات القصوى والدنيا المسموح بها حتى لا يتم الإنهيار بالكلال. وقد وضعت لذلك عدة قواعد أو معادلات تربط بين الخواص الداخلية للمعدن والأحمال المتكررة المؤثرة على المنشأ.

إذن فهذه المعادلات تقوم بحساب الإجهاد الأقصى والأدنى المسموح به لتفادى الإنهيار بالكلال وذلك بدلالة الإجهاد المتوسط σ_m أى الإجهاد الثابت والخواص الداخلية للمعدن مثل σ_e , σ_u ويتم هذا فى حالة دورات الإجهاد الغير معكوسة كليا $(\sigma_m \neq 0.0)$ وبصفة عامة فإنه ينبغى أن لاتزيد أكبر قيمة للإجهاد يتعرض لها المعدن عن قيمة σ_y.

أما فى حالة الدورات المعكوسة كليا $(\sigma_m = 0.0)$ فإن أكبر قيمة للإجهاد σ_{min} , σ_{max} ينبغى أن لا تزيد عن قيمة σ_e.

فى حالة إعتبار عامل أمان فإن الذى يُقسم على عامل الأمان هو الخواص الخاصة بالمعدن σ_u , σ_y , σ_e (الإجهادات الداخليه)

وتأخذ هذه المعادلات الشكل الآتى:

Soderberg rule	Goodman rule	Gerber rule
$\frac{\sigma_r}{\sigma_e} + \frac{\sigma_m}{\sigma_y} = 1$	$\frac{\sigma_r}{\sigma_e} + \frac{\sigma_m}{\sigma_u} = 1$	$\frac{\sigma_r}{\sigma_e} + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_u}\right)^2 = 1$
 More safe	 Less cost	

حيث:

1- Repeated stress : $\sigma_r = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$

2- Mean stress : $\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$

3- Range of stresses $R = \sigma_{max} - \sigma_{min}$

• Modified Goodman diagram:

• يعتبر التمثيل البيانى لقانونى Soderberg وGoodman هو ما يسمى المثلث التصميمى للكلال Fatigue Design Triangle