Mechanical Properties of Materials

Mechanical properties of materials define their behavior under applied forces, including how they deform, resist stress, and fail. These properties are critical in engineering, manufacturing, and materials selection, ensuring that components perform safely and efficiently under different conditions.

الخصائص الميكانيكية للمواد تحدد سلوكها تحت تأثير القوى المطبقة، بما في ذلك كيفية تشوهها، ومقاومتها للإجهاد، وطريقة فشلها.
تُعد هذه الخصائص ضرورية في مجالات الهندسة والتصنيع واختيار المواد، لضمان أداء المكونات بأمان وكفاءة في مختلف الظروف.

Understanding these properties helps engineers choose the right materials for different applications, ensuring durability, safety, and efficiency in structures, machinery, and consumer products.

فهم هذه الخصائص يساعد المهندسين على اختيار المواد المناسبة للتطبيقات المختلفة، مما يضمن المتانة والسلامة والكفاءة في الهياكل والآلات والمنتجات الصناعية.

- ***Key Mechanical Properties:*** **أهم الخصائص الميكانيكية**

1. ***Strength*** – The ability of a material to withstand an applied force without failure.

المقاومة: قدرة المادة على تحمل القوى المطبقة دون فشل.

Tensile Strength: Resistance to pulling forces. مقاومة الشد: مقاومة قوى السحب

Compressive Strength: Resistance to squeezing forces مقاومة الضغط: مقاومة قوى الضغط

Shear Strength: Resistance to forces causing sliding between layers.

مقاومة القص: مقاومة القوى التي تسبب انزلاق الطبقات

2. ***Hardness*** – Resistance to deformation, scratching, or indentation. Measured using tests like Brinell, Rockwell, and Vickers.

الصلادة: مقاومة المادة للتشوه أو الخدش أو الانبعاج، ويتم قياسها بعدة اختبارات مثل برينيل (Brinell) وروكويل (Rockwell) وفيكرز (Vickers).

3. ***Ductility*** – The ability to undergo plastic deformation before breaking, usually measured as elongation percentage.

اللدونة : قدرة المادة على الخضوع للتشوه البلاستيكي قبل الكسر، وعادةً ما تُقاس كنسبة الاستطالة.

4. ***Brittleness*** – The tendency to break or fracture without significant deformation. Brittle materials, like glass, fail suddenly.

الهشاشة : ميل المادة للكسر أو الانهيار دون حدوث تشوه كبير، مثل الزجاج الذي يفشل بشكل مفاجئ.

5. ***Toughness*** – The ability to absorb energy and resist fracture. It combines strength and ductility.

المتانة : قدرة المادة على امتصاص الطاقة ومقاومة الكسر، وهي مزيج من المقاومة واللدونة.

6. ***Elasticity*** – The ability of a material to return to its original shape after deformation when the applied force is removed. Governed by Young's Modulus (Elastic Modulus).

المرونة : قدرة المادة على العودة إلى شكلها الأصلي بعد إزالة القوة المؤثرة عليها، وتُقاس بمعامل يونغ.(Young's Modulus)

7. ***Plasticity*** – The ability to permanently deform without breaking.

اللدونة الدائمة : قدرة المادة على التشوه بشكل دائم دون أن تنكسر.

8. ***Creep*** – Slow, time-dependent deformation under constant stress, common in materials exposed to high temperatures.

الزحف : التشوه البطيء للمادة بمرور الوقت تحت تأثير إجهاد ثابت، وهو شائع في المواد المعرضة لدرجات حرارة عالية.

9. ***Fatigue*** – The weakening or failure of a material due to repeated or cyclic loading, even when stress levels are below the ultimate tensile strength.

الإجهاد المتكرر : ضعف المادة أو فشلها نتيجة التحميل المتكرر أو الدوري، حتى لو كانت مستويات الإجهاد أقل من مقاومة الشد القصوى.

10. ***Resilience*** – The ability to absorb energy when deformed elastically and release it upon unloading.

المطاوعة : قدرة المادة على امتصاص الطاقة عند تشوهها بمرونة، وإطلاقها عند إزالة الحمل.

- ***Stress and Strain***
  - ***Material stress***:
    is the force applied per unit area of a material, which results in a change in its shape or size.
    It is expressed mathematically as: Stress = Force/Area
  - ***Unit***: Stress is measured in Newton per square meter (N/m^2) or Pascal (Pa) in the International System of Units (SI).

إجهاد المادة (Stress) هو القوة المؤثرة على وحدة المساحة من المادة، والتي تؤدي إلى تغير في شكلها أو حجمها. يُقاس الإجهاد بوحدة النيتون لكل متر مربع (N/m^2) أو الباسكال (Pa) في النظام الدولي للوحدات (SI).

  - ***Material strain:***
    is the measure of deformation a material undergoes due to an applied stress. It is defined as the ratio of change in length to the original length of the material.
    Mathematically, it is expressed as: Strain = Change in Length / Original Length
  - ***Unit***: Strain is a dimensionless quantity since it is a ratio of lengths.

انفعال المادة (Strain) هو مقياس التشوه الذي تتعرض له المادة نتيجة تطبيق الإجهاد عليها. يُعرف بأنه نسبة التغير في الطول إلى الطول الأصلي للمادة.

الوحدة: الانفعال هو كمية بلا أبعاد لأنه يمثل نسبة بين أطوال.

- ***Stress-Strain Behavior*** **سلوك الاجهاد والانفعال**

Stress-strain behavior describes how a material deforms under applied forces. It is typically analyzed using a stress-strain curve, which provides insight into the mechanical properties of a material.

يصف **سلوك الإجهاد والانفعال** كيفية تشوه المادة عند تعرضها للقوى المؤثرة عليها. يتم تحليله عادةً باستخدام منحنى الإجهاد والانفعال، والذي يوفر نظرة على الخصائص الميكانيكية للمادة.

1. Elastic Deformation (Hooke's Law) (قانون هوك) التشوه المرن

Elastic deformation occurs when a material returns to its original shape after the applied stress is removed.

يحدث التشوه المرن عندما تعود المادة إلى شكلها الأصلي بعد إزالة الحمل المطبق او القوة المؤثرة.

It follows Hooke's Law, which states: $\Omega = E \cdot \varepsilon$

يتبع قانون هوك، والذي ينص على:

where:

Ω = Stress (force per unit area) الإجهاد (القوة لكل وحدة مساحة)

E = Elastic modulus (Young's modulus) معامل المرونة (معامل يونغ)

ε = Strain (change in length/original length) الانفعال (التغير في الطول / الطول الأصلي)

- ***Characteristics***:الخصائص

- Linear relationship between stress and strain علاقة خطية بين الإجهاد والانفعال
- No permanent deformation لا يوجد تشوه دائم
- Material behaves like a spring المادة تتصرف مثل الزنبرك

Example: Metals in the initial loading phase, rubber within small deformations

مثال: المعادن في مرحلة التحميل الأولية، والمطاط عند التشوهات الصغيرة

2. Plastic Deformation and Yield Strength التشوه اللدن ومقاومة الخضوع

Plastic deformation occurs when a material is permanently deformed after surpassing its yield strength (δ_y).

يحدث التشوه اللدن عندما تتشوه المادة بشكل دائم بعد تجاوزها إجهاد الخضوع.(δy)

The yield strength is the stress at which the material transitions from elastic to plastic behavior.

Beyond this point, deformation is no longer reversible, and atomic bonds begin to slip.

إجهاد الخضوع هو النقطة التي تتحول عندها المادة من السلوك المرن إلى السلوك اللدن .بعد هذه النقطة، يصبح التشوه غير قابل للانعكاس، وتبدأ الروابط الذرية في الانزلاق.

- ***Characteristics***:

- No longer follows Hooke's Law لا يتبع قانون هوك
- Permanent shape change تغير دائم في الشكل
- Occurs in ductile materials like metals (e.g., aluminum, steel)

يحدث في المواد القابلة للسحب مثل المعادن (مثال: الألمنيوم والصلب)

Example: A bent paperclip remains bent because it has undergone plastic deformation.

مثال: عند ثني مشبك الورق وبقائه في وضع منحني، فإنه قد خضع لتشوه لدن.

3. Fracture, Toughness, and Ductility الكسر، المتانة، واللدونة

- Fracture الكسر

Fracture is the breaking of a material when stress exceeds its ultimate strength.

يحدث الكسر عندما تتعرض المادة لإجهاد يتجاوز مقاومتها القصوى.

Can be ductile (with noticeable plastic deformation) or brittle (without significant deformation).

يمكن أن يكون الكسر لدنًا (مع وجود تشوه ملحوظ) أو هشًا (بدون تشوه واضح).

Brittle materials (e.g., glass, ceramics) fail suddenly, while ductile materials (e.g., steel, aluminum) show warning signs like necking.

المواد الهشة (مثل الزجاج والسيراميك) تنكسر فجأة، في حين أن المواد اللدنة (مثل الفولاذ والألمنيوم) تظهر علامات تحذيرية مثل التضييق (Necking) قبل الكسر.

- Toughness المتانة

Toughness is the ability of a material to absorb energy before fracturing.

المتانة هي قدرة المادة على امتصاص الطاقة قبل أن تنكسر.

Measured as the area under the stress-strain curve.

يتم قياسها كالمساحة تحت منحنى الإجهاد والانفعال.

High toughness materials resist crack propagation (e.g., metals like titanium).

المواد ذات المتانة العالية تقاوم انتشار الشقوق (مثل سبائك التيتانيوم).

- Ductility اللدونة

Ductility refers to a material's ability to undergo significant plastic deformation before fracture.

اللدونة هي قدرة المادة على التشوه بشكل كبير قبل الكسر.

Expressed as percent elongation or percent reduction in area.

يتم التعبير عنها كنسبة الاستطالة المئوية أو نسبة انخفاض المساحة.

Ductile materials can stretch or bend without breaking (e.g., copper wires, mild steel).

المواد اللدنة يمكن أن تتمدد أو تنحني دون أن تنكسر (مثل النحاس والصلب الطري).

- ***Mechanical Testing: Tensile, Compression, and Hardness Tests*** **اختبار الشد، الضغط، والصلادة**

Mechanical testing is performed to evaluate a material's mechanical properties, such as strength, ductility, and hardness. The most common tests include tensile testing, compression testing, and hardness testing.

تُجرى الاختبارات الميكانيكية لتقييم الخصائص الميكانيكية للمواد، مثل القوة، اللدونة، والصلادة. تشمل أكثر الاختبارات شيوعًا اختبار الشد، اختبار الضغط، واختبار الصلادة.

1. Tensile Testing (Pulling Test) **اختبار الشد أو السحب**

Measures how a material reacts to a pulling force. يقيس كيفية استجابة المادة لقوة شد محورية

Determines properties like yield strength, ultimate tensile strength (UTS), elongation, and Young's modulus.

يحدد إجهاد الخضوع، مقاومة الشد القصوى(UTS) ، الاستطالة، ومعامل يونغ.

- ***Procedure:*** **طريقة الاختبار**

1. A specimen is clamped at both ends and pulled at a controlled rate.

يتم تثبيت العينة من الطرفين وسحبها بمعدل متحكم فيه.

2. The force and elongation are recorded until fracture occurs.

يتم تسجيل القوة والاستطالة حتى حدوث الكسر

3. A stress-strain curve is plotted to analyze behavior. يتم رسم منحنى الإجهاد والانفعال لتحليل السلوك

- ***Key Results:***

Elastic region: Follows Hooke's Law. المنطقة المرنة: تتبع قانون هوك

Yield strength: Transition from elastic to plastic deformation.

إجهاد الخضوع: نقطة الانتقال من التشوه المرن إلى التشوه اللدن.

Ultimate tensile strength (UTS): Maximum stress before necking.

مقاومة الشد القصوى (UTS) : أعلى إجهاد تتحمله المادة قبل حدوث التضيق.(Necking)

Fracture point: When the material breaks. نقطة الكسر: عندما تنكسر العينة

- ***Applications***:

Used for metals, polymers, and composites in engineering and manufacturing.

التطبيقات: يستخدم لاختبار المعادن، البوليمرات، والمركبات في الهندسة والتصنيع

2. Compression Testing (Pushing Test) اختبار الضغط

Opposite of tensile testing, where a material is compressed instead of pulled.

عكس اختبار الشد، حيث يتم ضغط المادة بدلاً من سحبها

Evaluates compressive strength, elastic modulus, and deformation behavior.

يقيم مقاومة الضغط، معامل المرونة، وسلوك المادة تحت الحمل الضغطي.

- ***Procedure:*** **طريقة الاختبار**

1. A sample is placed between two plates and compressed. يتم وضع العينة بين صفيحتين والضغط عليها
2. Force and displacement are measured. يتم قياس القوة والإزاحة
3. The stress-strain curve is analyzed. يتم تحليل منحنى الإجهاد والانفعال

- ***Key Results:***

Compressive strength: Maximum stress before failure. مقاومة الضغط: أقصى إجهاد تتحمله المادة قبل الفشل

Elastic modulus: Stiffness of the material in compression. معامل المرونة: مدى صلابة المادة عند الضغط

Failure mode: Brittle materials may crack, while ductile materials may deform.

طريقة الفشل: المواد الهشة قد تتشقق، بينما المواد اللدنة قد تتشوه.

- ***Applications***:

Common in testing concrete, ceramics, and foams.

التطبيقات: شائع في اختبار الخرسانة، السيراميك، والرغوات.

3. Hardness Testing **اختبار الصلادة**

Measures a material's resistance to indentation, wear, and permanent deformation.

يقيس مقاومة المادة للانبعاج، التآكل، والتشوه الدائم.

Different hardness scales exist depending on material and application:

هناك أنواع مختلفة من اختبارات الصلادة حسب المادة والتطبيق:

1. A specific force is applied using an indenter. يتم تطبيق قوة معينة باستخدام أداة اختبار الصلادة
2. The depth or size of the indentation is measured. يتم قياس عمق أو حجم الانبعاج
3. Hardness is calculated based on material resistance. يتم حساب قيمة الصلادة بناءً على مقاومة المادة

- ***Applications***:

Used in quality control for metals, plastics, and coatings.

التطبيقات: يُستخدم في مراقبة الجودة للمعادن، البلاستيك، والطلاءات.

- ***Material Failure: Fracture Mechanics and Fatigue*** **فشل المواد: ميكانيكا الكسر والإجهاد**

Material failure occurs when a material can no longer withstand applied loads and deforms or breaks. Two key mechanisms of failure are fracture mechanics and fatigue.

يحدث فشل المواد عندما لا تستطيع المادة تحمل الأحمال المطبقة عليها، مما يؤدي إلى تشوهها أو كسرها. هناك آليتان رئيسيتان للفشل هما ميكانيكا الكسر والإجهاد (التعب).

1. Fracture Mechanics ميكانيكا الكسر

Fracture mechanics is the study of how cracks initiate and propagate in materials. It helps predict failure and design materials that resist cracking.

تدرس ميكانيكا الكسر كيفية نشوء وتقدم التشققات في المواد. يساعد هذا العلم في التنبؤ بالفشل وتصميم مواد مقاومة للكسر.

- ***Types of Fracture*** **أنواع الكسر**
  - ***Brittle Fracture*****: الكسر الهش**

- Occurs with little or no plastic deformation. يحدث مع قليل أو بدون تشوه لدن
- Fast and catastrophic failure. سريع وكارثي
- Common in ceramics, glass, and high-strength metals

. شائع في المواد مثل السيراميك والزجاج والمعادن عالية الصلابة

Example: Glass breaking suddenly. انكسار الزجاج فجأة.

  - ***Ductile Fracture:*** **الكسر المطيل**

Involves plastic deformation before failure. يحدث مع تشوه لدن قبل الفشل .

Slower and more predictable أبطأ وأكثر توقعًا

Common in metals like steel and aluminum. شائع في المعادن مثل الفولاذ والألمنيوم

- ***Fracture Mechanics Concepts*** مفاهيم في ميكانيكا الكسر

Stress Intensity Factor (K): Describes the stress near a crack tip.

معامل شدة الإجهاد :(K) يصف الإجهاد بالقرب من طرف الشق.

Fracture Toughness (Kc): A material's resistance to crack propagation.

مقاومة الكسر :(Kc) قدرة المادة على مقاومة انتشار الشقوق.

Griffith's Theory: Crack growth occurs when the energy release rate exceeds a critical value.

نظرية غريفيث :(Griffith's Theory) تنمو الشقوق عندما يتجاوز معدل تحرير الطاقة قيمة حرجة.

2. Fatigue Failure فشل الإجهاد

Fatigue is the progressive failure of materials under cyclic loading. Even if stresses are below the material's yield strength, repeated loading can cause failure.

الإجهاد هو الفشل التدريجي للمواد تحت تأثير الأحمال الدورية. حتى لو كانت الأحمال أقل من حد الخضوع للمادة، فإن التكرار المستمر لهذه الأحمال قد يؤدي إلى الفشل.

- ***Fatigue Stages*** مراحل فشل الإجهاد

1. *Crack Initiation*: Small cracks form due to stress concentrations (e.g., at surface defects or sharp corners).

بداية التشقق: تتشكل شقوق صغيرة بسبب تركيزات الإجهاد (مثل العيوب السطحية أو الزوايا الحادة).

2. *Crack Propagation*: Cracks grow incrementally with each loading cycle.

نمو التشقق: يزداد حجم الشق تدريجيًا مع كل دورة تحميل.

3. *Final Fracture*: The remaining material fails suddenly when the crack reaches a critical size.

الكسر النهائي: يحدث انهيار مفاجئ عندما يصل الشق إلى حجم حرج.

- ***Factors Affecting Fatigue*** العوامل التي تؤثر على الإجهاد

Stress Range: Higher stress amplitudes lead to faster fatigue failure.

نطاق الإجهاد: تؤدي القيم العالية للإجهاد إلى فشل أسرع.

Material Properties: Tougher materials have better fatigue resistance.

خصائص المادة: تتمتع المواد الأكثر متانة بمقاومة أفضل للإجهاد.

Surface Finish: Rough surfaces have more stress concentrations, leading to earlier failure.

تشطيب السطح: تزيد الأسطح الخشنة من تركيزات الإجهاد، مما يؤدي إلى فشل مبكر.

Environment: Corrosion accelerates fatigue (corrosion fatigue).

البيئة: تسرع التفاعلات الكيميائية مثل التآكل من عملية الإجهاد

- ***Fatigue Life Prediction*** التنبؤ بعمر المادة تحت الإجهاد

S-N Curve (Wöhler Curve): Shows the number of cycles (N) a material can withstand at a given stress level (S).

منحنى وولر : يوضح عدد الدورات (N) التي يمكن أن تتحملها المادة عند مستوى إجهاد معين.(S)

Miner's Rule: Estimates damage accumulation under variable loading.

قاعدة مينر: تعمل على تقدير تراكم الضرر تحت الأحمال المتغيرة.

- ***Preventing Fracture and Fatigue*** **طرق منع الكسر والإجهاد**

- *Design Improvements*: Avoid sharp corners and stress concentrations.

تحسين التصميم: تجنب الزوايا الحادة وتقليل تركيزات الإجهاد.

- *Material Selection*: Use high-toughness or fatigue-resistant materials.

اختيار المواد المناسبة: استخدام مواد ذات مقاومة عالية للكسر والإجهاد.

- *Surface Treatments*: Polishing, shot peening, and coatings to reduce crack initiation.

معالجة الأسطح: مثل التلميع، والتقسية بالطلقات لتقليل بدء التشققات

- *Regular Inspection*: Detect cracks early using NDT (e.g., ultrasonic testing).

الفحص الدوري: الكشف عن الشقوق مبكرًا باستخدام الفحوصات غير المتلفة (مثل الاختبارات بالموجات فوق الصوتية).

- *Load Management*: Reduce cyclic loading through optimized design

إدارة الأحمال: تقليل تأثير الأحمال الدورية من خلال التصميم الهندسي الأمثل.