STRENGTH OF MATERIALS

UNIT 1

Stress

जब किसी वस्तु पर बहरी बल लगाया जाता है तो वस्तु के आतंरिक भाग में एक प्रतिरोधक बल उत्पन्न होता है जो लगाये गए बाहरी बल का प्रतिरोध करता है |

इकाई क्षेत्रफल पर लगने वाले आतंरिक प्रतिरोधक बल को ही Stress (प्रतिबल) कहते हैं | अर्थात आतंरिक प्रतिरोधक बल और अनुप्रस्थ काट के क्षेत्रफल को Stress (प्रतिबल) कहते हैं | इसे σ से प्रदर्शित करते हैं |

$$\text{Stress} = \frac{Internal\ Resisting\ Force}{Cross\ Sectional\ Area}$$

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

इसका मात्रक N/mm^2 होता है |

Type of Stress

Tensile Stress : जब किसी वस्तु पर इस प्रकार का बल लगाया जाए कि बल लगने पर उसकी लंबाई में वृद्धि **हो, तो इस प्रकार के बल को** Tensile Load (तानने वाला बल) **कहते हैं। इस प्रकार के बल के कारण वस्तु में उत्पन्न होने वाले** stress **को** Tensile Stress (तानने वाला तनाव) **कहते हैं। इसे σ_t से प्रदर्शित करते हैं |**

Example:

- Wire या rope में weight लटकाना।
- Cable में खिंचाव डालना।

Effect : वस्तु की लंबाई बढ़ती है और cross-section area घट सकता है।

Compressive Stress : जब किसी वस्तु पर इस प्रकार का बल लगाया जाए कि बल लगने पर उसकी लंबाई में कमी **हो, तो इस प्रकार के बल को** Compressive Load (दबाव डालने वाला बल) **कहते हैं। इस प्रकार के बल के कारण वस्तु में उत्पन्न होने वाले** stress **को** Compressive Stress (दबाव तनाव) **कहते हैं। इसे σ_c से प्रदर्शित करते हैं |**

Example:

- Building के column पर structure का weight।
- Piston में दबाव डालना।

Effect : वस्तु की लंबाई घटती है और cross-section area बढ़ सकता है।

Shear Stress : जब किसी वस्तु पर इस प्रकार का बल लगाया जाए कि वह उसकी layers को एक-दूसरे के समानांतर दिशा में खिसकाने **का प्रयास करे, तो इस प्रकार के बल को** Shear Load (कतरने वाला बल / कटाव बल) **कहते हैं। इस प्रकार के बल के कारण वस्तु में उत्पन्न होने वाले** stress **को** Shear Stress (कटाव तनाव) **कहते हैं। इसे τ से प्रदर्शित करते हैं |**

Example:

- Scissors से paper काटना।
- Rivet या bolt पर लगने वाला lateral force।
- Beam में applied transverse load।

Effect : वस्तु की layers एक-दूसरे के ऊपर **sliding motion** करती हैं।

Strain

जब किसी वस्तु पर बहरी बल लगाया जाता है तो वस्तु के लम्बाई या आकार में परिवर्तन होता है | लम्बाई या आकार में परिवर्तन एवं प्रारंभिक लम्बाई के अनुपात को Strain कहते हैं |इसे £ से प्रदर्शित करते हैं |

$$\text{Strain} = \frac{Change\ in\ Length}{Original\ Length}$$

$$£ = \frac{\delta l}{l}$$

यह एक विमाहीन राशि है |

Type of Strain

1. Tensile Strain : जब किसी वस्तु पर इस प्रकार बल लगाया जाए कि उसकी लंबाई में वृद्धि **हो, तो इस प्रकार उत्पन्न** strain **को** Tensile Strain **कहते हैं।**

2. Compressive Strain : जब किसी वस्तु पर इस प्रकार बल लगाया जाए कि उसकी लंबाई में कमी **हो, तो इस प्रकार उत्पन्न** strain **को** Compressive Strain **कहते हैं।**

3. Shear Strain : जब किसी वस्तु पर इस प्रकार बल लगाया जाए कि उसकी layers एक-दूसरे के समानांतर दिशा में खिसकें**, तो इस प्रकार उत्पन्न** strain **को** Shear Strain **कहते हैं।**

Lateral, Linear Strain & Poisson's Ratio

1. Linear Strain (रेखीय विकृति / लंबाई विकृति) : जब किसी वस्तु पर बल लगाया जाए और उसके कारण मूल लंबाई में परिवर्तन **उसी दिशा में हो, तो उस परिवर्तन को** Linear Strain **कहते हैं।**

$$\text{Linear Strain } (\epsilon) = \frac{\Delta L}{L}$$

2. Lateral Strain (पार्श्व विकृति / बगल की विकृति) : जब किसी वस्तु पर लगने वाले बल से उसका आयाम (width या diameter) लंबाई के लंबवत दिशा में बदलता है**, तो उस परिवर्तन को** Lateral Strain **कहते हैं।**

$$\text{Lateral Strain } (\epsilon_{\text{lat}}) = \frac{\text{Change in Diameter}}{\text{Original Diameter}}$$

3. Poisson's Ratio (σ) : Lateral strain और longitudinal strain के अनुपात को **Poisson's Ratio** कहते हैं। इसे μ से प्रदर्शित करते हैं |

$$\mu = \frac{Lateral\ Strain}{Linear\ Strain}$$

Gradually Applied Load

Definition: A *gradually applied load* (also called *static load* or *slowly applied load*) is a load that increases slowly from zero to its full value.

क्रमशः लगाया गया भार (जिसे स्थिर भार या धीरे-धीरे लगाया गया भार भी कहा जाता है) वह भार होता है जो शून्य से अपने पूर्ण मान तक धीरे-धीरे बढ़ाया जाता है।

Example: When you slowly hang a weight on a spring or beam. (जब आप किसी स्प्रिंग या बीम पर धीरे-धीरे एक भार लटकाते हैं।)

Stress Produced: If a load W is applied gradually,

$$\text{Stress} = \frac{W}{A}$$

where A is the cross-sectional area.

Suddenly Applied Load

Definition: A *suddenly applied load* is one that is applied instantly (suddenly) but without any velocity (not dropped from a height). The load is applied in zero time but does not produce an impact — it just acts suddenly.

अचानक लगाया गया भार वह होता है जो एकदम अचानक लगाया जाता है, लेकिन उसमें कोई चाल (velocity) नहीं होती — अर्थात् उसे किसी ऊँचाई से गिराया नहीं जाता। यह भार बहुत कम समय (लगभग शून्य समय) में लगाया जाता है, परंतु इससे कोई आघात उत्पन्न नहीं होता — यह केवल अचानक कार्य करता है।

Example: When you quickly hang a weight on a spring without any fall (you just hook it suddenly).

जब आप किसी स्प्रिंग पर बिना गिराए, एकदम जल्दी से कोई भार टांग देते हैं (यानी अचानक उसे लटका देते हैं)।

Stress Produced: The maximum stress produced is **twice** the stress caused by the same load applied gradually. (अचानक लगाए गए भार से उत्पन्न अधिकतम तनाव, उसी भार को क्रमशः लगाने पर उत्पन्न तनाव से **दोगुना** होता है।)

Impact Load

Definition: An *impact load* occurs when a load is dropped from a certain height and strikes a body (like a beam or bar). The load has velocity at the time of impact, so it produces a much higher stress.

आघात भार तब उत्पन्न होता है जब कोई भार किसी निश्चित ऊँचाई से गिरकर किसी वस्तु (जैसे बीम या छड़) से टकराता है। टकराने के समय उस भार के पास **चाल (velocity)** होती है, इसलिए यह बहुत अधिक **तनाव (stress)** उत्पन्न करता है।

Example: A hammer striking a nail, or a weight falling onto a beam. (जैसे — हथौड़े का कील पर प्रहार करना, या किसी बीम पर भार का गिरना।)

Stress Produced:
The impact stress depends on:

- The **height of fall (h)**
- The **deflection (δ)** of the member due to the load and can be estimated from energy balance:

$$\text{Impact Stress} = \sigma_{\text{gradual}} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2hE}{\sigma_{\text{gradual}} L}}\right]$$

(where E is modulus of elasticity and L is length of member)

Volumetric Strain (आयतन विकृति)

Volumetric Strain किसी material का वह गुण है जो बताता है कि जब उस पर **uniform pressure** या compressive/tensile stress लगाया जाता है, तो उसका **कुल आयतन (Volume) कितना बदलता है**।

Formula:

$$\text{Volumetric Strain} = \frac{\Delta V}{V}$$

जहाँ,

- ΔV = आयतन में परिवर्तन
- V = मूल आयतन

Elastic Constants

Elastic Constants वे गुण हैं जो किसी material की **elastic behavior** को दर्शाते हैं, यानी जब material पर बल लगाया जाता है और हटाया जाता है तो वह कितनी आसानी से अपनी मूल अवस्था में लौटता है।

1. **Modulus of Elasticity / Young's Modulus (E)** : यह वह गुण है जो किसी material की **tensile या compressive stress और strain के बीच संबंध** को दर्शाता है। यह बताता है कि material कितना stretch या compress होता है। Stress और strain के अनुपात को **Young's Modulus** कहते हैं।

$$E = \frac{\text{Stress}}{\text{Strain}}$$

2. **Bulk Modulus (K)** : यह वह गुण है जो किसी material का **volume change** बताता है जब उस पर **uniform pressure** लगाया जाता है। Pressure और volumetric strain के अनुपात को **Bulk Modulus** कहते हैं।

$$K = \frac{\text{Volumetric Stress}}{\text{Volumetric Strain}}$$

3. **Shear Modulus / Modulus of Rigidity (G)** : यह वह गुण है जो किसी material की **shear stress और shear strain के बीच संबंध** को दर्शाता है। यह बताता है कि material कितनी आसानी से **shape बदलता है बिना volume बदले**। Shear stress और shear strain के अनुपात को **Shear Modulus** कहते हैं।

$$G = \frac{\text{Shear Stress}}{\text{Shear Strain}}$$

4. **Poisson's Ratio (σ)** : यह अनुपात बताता है कि जब material axial direction में stretch या compress होता है, तो **lateral direction में कितना contraction या expansion** होता है। Lateral strain और longitudinal strain के अनुपात को **Poisson's Ratio** कहते हैं।

$$\mu = \frac{Lateral\ Strain}{Linear\ Strain}$$

Relationship Between Elastic Constants :

1. E = 2G(1+μ)
2. E= 3k (1-2μ)
3. $E = \frac{9KG}{3K+G}$

Question for Homework

If E = Young's Modulus, G = Rigidity Modulus and K = Bulk Modulus, then prove that:

यदि E = प्रत्यास्थता मापांक (यंग मापांक), G = अपरूपण मापांक तथा K आयतन मापांक हों तो सिद्ध कीजिये कि :

$$E = \frac{9KG}{3K + G}$$

Question

The following data relate to a bar subjected to a tensile test:

Diameter of the rod (d) = 30mm

Tensile load (p) = 54kN

Gauge length (l) = 300mm

Extension on the bar (δl)= 0.112mm

Change in the diameter (δd)= 0.00366mm

Calculate:

(i) Poisson's ratio

(ii) The value of three moduli (E, C, K)

निम्नलिखित आंकड़े एक तन्य परीक्षण (Tensile Test) के अंतर्गत रखी गई एक छड़ से संबंधित हैं:

छड़ का व्यास (d) = 30 मिमी

तन्य बल (P) = 54 किलो न्यूटन

गेज लंबाई (l) = 300 मिमी

छड़ में बढ़ाव (δl) = 0.112 मिमी

व्यास में परिवर्तन (δd) = 0.00366 मिमी

गणना करें:

(i) पॉइसन अनुपात (Poisson's Ratio)

(ii) तीनों मापांक (E, C, K)

Thermal Stress

Thermal Stress किसी material में उत्पन्न वह **stress** है जो **temperature के परिवर्तन** (गर्म या ठंडा होने) के कारण material के **विकृति (deformation) पर रोक लगने** से उत्पन्न होता है। यदि material को **temperature बदलने पर स्वतंत्र रूप से expand या contract** करने दिया जाए, तो thermal stress नहीं आएगा।

$$\sigma_t = E\alpha\Delta T$$

जहाँ,

- σ_t = Thermal Stress
- E = Young's Modulus
- α = Coefficient of Linear Expansion
- ΔT = Temperature Change

यदि किसी rigid rod को गर्म किया जाए और उसे किसी structure में रोक दिया जाए ताकि वह expand न हो सके, तो rod में **compressive stress** उत्पन्न होगा। इसी तरह, ठंडा करने पर **tensile stress** उत्पन्न हो सकता है।

Question

An underground pipeline is laid when the temperature was 20^0C. What stress would be produced in it when the temperature falls down to - 2^0C and pipe is unable to contract? Take α = 12 * 10^{-6} per °C and E = 2 x 10^5 N /mm^2

तापमान 20^0C होने पर भूमिगत पाइपलाइल बिछाई जाती है। जब तापमान - 2^0C तक गिर जाता है और पाइप सिकुड़ नहीं पाता तो इसमें कितना तनाव उत्पन्न होगा ? α = 12 * 10^{-6} प्रति °C and E = 2 x 10^5 N /mm^2लीजिए।

Differences between Stress and Strength

क्र.सं.	विषय	Stress	Strength
1	**Definition (परिभाषा)**	Stress किसी पदार्थ पर लगने वाले **बल का प्रभाव प्रति यूनिट क्षेत्रफल** है।	Strength किसी पदार्थ की वह **अधिकतम क्षमता** है, जिसके द्वारा वह **लोड सह सकता है बिना टूटे**।
2	**Nature / Purpose (प्रकृति/उद्देश्य)**	Stress एक **मापनीय परिमाण** है, जो बताता है कि लोड कितनी तीव्रता से पदार्थ पर काम कर रहा है।	Strength एक **सामग्री का गुण** है, जो यह तय करता है कि वह कितना लोड सह सकती है।

Factor of Safety (FOS)

Definition: Factor of Safety किसी संरचना या machine part की **मजबूती और सुरक्षा का अनुपात** है, जो बताता है कि material की **अधिकतम क्षमता (Strength)** और उस पर लगाए गए **वास्तविक लोड (Actual Load)** के बीच कितना margin है।

$$\text{Factor of Safety (FOS)} = \frac{\text{Ultimate Stress / Allowable Stress}}{\text{Working Stress / Actual Stress}}$$

Explanation:
यदि कोई component 1000 N तक stress सह सकता है और उस पर वास्तविक load 500 N लगाया गया है, तो FOS = 1000/500 = 2। इसका मतलब यह है कि component **दो गुना सुरक्षित** है और अचानक failure होने की संभावना कम है।

Ductile and Brittle Materials

लचीला (Ductile) पदार्थ : लचीला पदार्थ वह है जो टूटने से पहले पर्याप्त **विकृति (Deformation)** सह सकता है। इसे **खींचा या मोड़ा** जा सकता है।

उदाहरण:
माइल्ड स्टील, तांबा, एल्यूमिनियम, सोना, चांदी

विशेषताएँ:

- उच्च **तनाव क्षमता (Tensile Strength)**
- टूटने से पहले अधिक **विस्तार (Elongation)**
- तनाव–विकृति वक्र में स्पष्ट **Yield Point**
- अधिक **ऊर्जा अवशोषित करता है**

भंगुर (Brittle) पदार्थ : भंगुर पदार्थ वह है जो टूटने से पहले बहुत कम **विकृति** सह सकता है। यह **अचानक** टूट जाता है।

उदाहरण:
कास्ट आयरन, काँच, कंक्रीट, सिरैमिक्स, पत्थर

विशेषताएँ:

- उच्च **संपीड़न क्षमता (Compressive Strength)**, लेकिन कम **तनाव क्षमता**
- टूटने से पहले कम **ऊर्जा अवशोषित करता है**
- तनाव–विकृति वक्र में स्पष्ट **Yield Point नहीं**
- अचानक टूट जाता है

Mechanical Properties of a Material (सामग्री के यांत्रिक गुण)

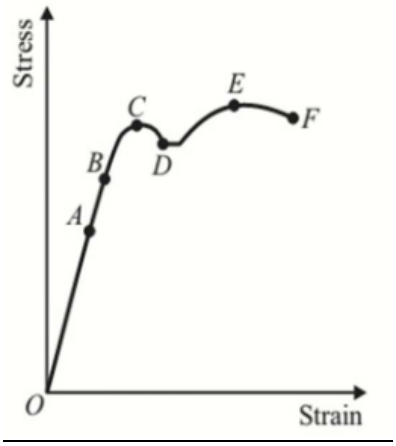
यांत्रिक गुण वे विशेषताएँ हैं जो किसी सामग्री की **बल, दबाव, खिंचाव, झुकाव आदि के प्रति प्रतिक्रिया** को दर्शाती हैं। ये गुण यह तय करते हैं कि सामग्री **कितनी मजबूत, टिकाऊ, लचीली या भंगुर** है।

1. **Tensile Strength** : Tensile Strength किसी पदार्थ का वह गुण है जिसके द्वारा वह **खींचाव भार** को सह सकता है और टूटने से पहले उसकी अधिकतम सीमा तय होती है।
   उदाहरण: माइल्ड स्टील, तांबा
2. **Compressive Strength** : Compressive Strength किसी पदार्थ का वह गुण है जिसके द्वारा वह **दबाव भार** को सह सकता है और टूटने या कुचलने से पहले उसकी अधिकतम सीमा तय होती है।
   उदाहरण: कंक्रीट, ईंट
3. **Shear Strength** : Shear Strength किसी पदार्थ का वह गुण है जिसकी कारण वह **फिसलने या काटने वाले बल** को सह सकता है।
   उदाहरण: स्टील रॉड, धातु की चादर
4. **Elasticity** : Elasticity किसी पदार्थ का वह गुण है जिसकी कारण जब किसी वस्तु पर लगाये गए बल को हटाया जाता है, तो वह अपनी **मूल अवस्था** में लौट आता है।
   उदाहरण: स्प्रिंग, रबर
5. **Plasticity** : Plasticity किसी पदार्थ का वह गुण है जिसके कारण जब उस पर बल लगाया जाता है और बल हटाया जाता है, तो वह **स्थायी विकृति** रह जाती है।
   उदाहरण: तांबा, एल्यूमिनियम
6. **Hardness** : Hardness किसी पदार्थ का वह गुण है जिसकी कारण उसकी **सतह को खरोंच, कट या घिसाई** से सुरक्षा मिलती है।
   उदाहरण: हीरा, हार्ड स्टील
7. **Toughness** : Toughness किसी पदार्थ का वह गुण है जिसके कारण वह **टूटने से पहले अधिकतम ऊर्जा अवशोषित** कर सकता है।
   उदाहरण: माइल्ड स्टील
8. **Brittleness** : Brittleness किसी पदार्थ का वह गुण है जिसके कारण वह **बिना किसी विकृति के अचानक टूट** जाता है।
   उदाहरण: काँच, कास्ट आयरन
9. **Ductility** : Ductility किसी पदार्थ का वह गुण है जिसके कारण उसे **खींचकर तार** बनाया जा सकता है।
   उदाहरण: तांबा, एल्यूमिनियम
10. **Malleability** : Malleability किसी पदार्थ का वह गुण है जिसके कारण उसे **हथौड़े या रोल से पतली चादर** में बदला जा सकता है।
    उदाहरण: सोना, एल्यूमिनियम

11. **Fatigue Strength** : Fatigue Strength किसी पदार्थ का वह गुण है जिसके कारण वह **बार-बार लोड/अनलोड** होने पर भी टूटता नहीं है।
    उदाहरण: एयरक्राफ्ट विंग्स, मशीन शाफ्ट
12. **Creep** : Creep किसी पदार्थ का वह गुण है जिसके कारण **लंबे समय तक स्थायी लोड** लगाने पर वह धीरे-धीरे विकृत हो जाता है।
    उदाहरण: उच्च तापमान पर धातु की रॉड, टर्बाइन ब्लेड

Stress-Strain diagram for ductile material

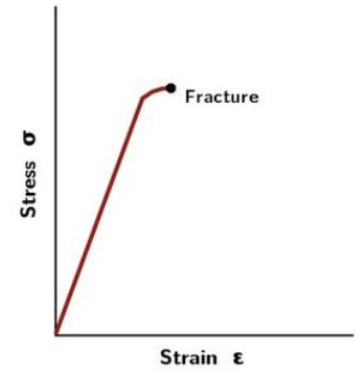
Stress-Strain Diagram वह ग्राफ है जो किसी पदार्थ पर लागू **Stress** और उससे उत्पन्न **Strain** के बीच संबंध को दर्शाता है। Ductile material में यह वक्र Elastic और Plastic region दोनों दिखाता है।



1. **O – Origin :** यह प्रारंभिक बिंदु है जहाँ कोई Stress नहीं है और material अपनी मूल अवस्था में होता है।
2. **A – Limits of Proportionality :** यह वह बिंदु है जहाँ तक यदि बल लगाया जाए तो उत्पन्न Stress और Strain समानुपाती होते हैं और material Hooke's Law का पालन करता है।
3. **B - Elastic Limit :** यह वह अधिकतम Stress है जिसके तहत बल हट जाने पर material अपनी **मूल अवस्था में पूरी तरह** लौट आता है।
4. **Yield Point :** Ductile materials में Yield Point दो भागों में आता है:
    - **C- Upper Yield Point:** यह वह Stress है जहाँ material **Plastic deformation शुरू करता है** और Stress अस्थायी रूप से अधिकतम होता है।
    - **D- Lower Yield Point:** यह वह Stress है जहाँ Stress स्थिर हो जाता है और material लगातार **Plastic deformation** दिखाता है।
5. **E – Ultimate Stress / Tensile Strength :** यह वह अधिकतम Stress है जिसे material सह सकता है और इसके बाद Necking शुरू हो जाता है।
6. **F – Fracture Point :** यह वह बिंदु है जहाँ material अंततः टूट जाता है।

Stress-Strain diagram for ductile material

1. **Origin :** प्रारंभिक बिंदु जहाँ कोई Stress नहीं है और material अपनी मूल अवस्था में होता है।
2. **Limits of Proportionality :** यह वह बिंदु है जहाँ Stress और Strain समानुपाती होते हैं और material Hooke's Law का पालन करता है।
3. **Elastic Limit :** यह वह अधिकतम Stress है जिस तक बल हट जाने पर material पूरी तरह अपनी **मूल अवस्था में लौट आता है**।
4. **Ultimate Stress / Fracture Point :** Brittle material में Elastic Limit और Ultimate Stress लगभग एक ही बिंदु पर होते हैं। Material Plastic deformation नहीं दिखाता और **इसी बिंदु पर अचानक टूट जाता है**।



Strain Energy

Strain Energy किसी material में वह **उर्जा है जो stress लगने पर store होती है** और जब load हटाया जाता है, तो material अपनी मूल अवस्था में लौटते समय यह उर्जा मुक्त कर देता है।

$$U = \frac{1}{2}\sigma\epsilon V$$

जहाँ,

- U = Strain Energy
- σ = Stress
- ϵ = Strain
- V = Volume of the material

Explanation: यदि किसी spring को compress या stretch किया जाए, तो उसमें Strain Energy store होती है और spring release करने पर यह energy वापस आती है।

Proof Stress

Proof Stress वह stress है जिस पर material में **एक निश्चित स्थायी विकृति** (permanent deformation) उत्पन्न होती है। इसे सामान्यतः **0.2% या 0.1% permanent strain** पर मापा जाता है।

Explanation: Proof Stress का उपयोग materials के लिए **safe working stress** तय करने में किया जाता है। इसका मतलब यह है कि जब material इस stress तक लोड किया जाए, तो उसकी स्थायी विकृति **बहुत कम** होगी।

Modulus of Resilience

Modulus of Resilience किसी material में वह **strain energy per unit volume** है जो **elastic limit तक store** हो सकती है।

$$U_r = \frac{\sigma_e^2}{2E}$$

जहाँ,

- U_r = Modulus of Resilience
- σ_e = Elastic Limit Stress
- E = Young's Modulus

Explanation: Material जितनी आसानी से elastic limit तक **energy absorb** कर सकता है, उतना resilient कहलाता है। यह **material की लचीलापन क्षमता** को दर्शाता है।

Breaking Stress

Breaking Stress वह अधिकतम **tensile stress** है जिसे material **टूटने (fracture) से पहले** सह सकता है। इसे **ultimate stress at fracture** भी कहते हैं।

Explanation:

- यह stress material की **अधिकतम क्षमता** को दर्शाता है।
- Ductile material में Breaking Stress **Ultimate Stress** के बाद Necking के दौरान आता है।
- Brittle material में Breaking Stress और Ultimate Stress लगभग **एक ही बिंदु पर** होते हैं।

$$\sigma_b = \frac{\text{Maximum Load at Fracture}}{\text{Original Cross-sectional Area}}$$

Importance:

- Structure या component के **failure point** को जानने के लिए।
- Design में **maximum safe load** तय करने में मदद करता है।

Question : Explain how Brinell test is carried out and which type of result it gives.

Brinell Hardness Test

Definition:
Brinell Hardness Test (BHN) एक method है जो किसी material की **hardness (कठोरता)** मापने के लिए प्रयोग किया जाता है।

Procedure (कैसे किया जाता है):

1. एक **hardened steel या tungsten carbide की गेंद** (diameter 10–20 mm) को material की सतह पर रखा जाता है।
2. Ball पर **known load (P)** लगाया जाता है, आमतौर पर 500–3000 kg, कुछ समय के लिए।
3. Load हटाने के बाद material की सतह पर **permanent indentation (गहरा दबाव/निशान)** बनता है।
4. Indentation का **diameter (d)** एक microscope या special scale से मापा जाता है।
5. Brinell Hardness Number (BHN) इस formula से calculate किया जाता है:

$$BHN = \frac{2P}{\pi D\left(D - \sqrt{D^2 - d^2}\right)}$$

जहाँ,

- P = Applied Load (kgf)
- D = Ball Diameter (mm)
- d = Indentation Diameter (mm)