



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA  
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

## NAUKA O MATERIAŁACH

### Wykład VIII: Odształcenie materiałów - właściwości sprężyste

JERZY LIS  
Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki  
Katedra Technologii Ceramiki i Materiałów Ogniotrwałych

---

---

---

---

---

---

---

---



### Treść wykładu:

1. Właściwości materiałów – wprowadzenie
2. Klasyfikacja reologiczna odształcenia materiałów
3. Statyczna próba rozciągania
4. Odształcenie sprężyste
  - 4.1. Prawo Hooke'a – moduły sprężystości
  - 4.2. Właściwości sprężyste układu dwóch atomów
  - 4.3. Odształcenie sprężyste kryształów
  - 4.4. Właściwości sprężyste materiałów wielofazowych
  - 4.5. Właściwości sprężyste materiałów porowatych
  - 4.6. Metody pomiaru modułów sprężystości
  - 4.7. Niesprężystość



NAUKA O MATERIAŁACH VIII: Odształcenie materiałów – właściwości sprężyste

---

---

---


---

---

---

---


---



### Właściwości tworzyw - wprowadzenie

- O możliwości zastosowania danego materiału decydują jego właściwości użytkowe
- Zachowanie się danego materiału w środowisku pracy to zaplanowana przez użytkownika (założona) odpowiedź na działające na niego czynniki (bodźce)

**SCHEMAT ODDZIAŁYWANIA CZYNNIKÓW NA MATERIAŁ**



```

graph LR
    A[czynnik (czas)] --> B[MATERIAŁ]
    B --> C[odzew (właściwości)]
    
```

NAUKA O MATERIAŁACH VIII: Odształcenie materiałów – właściwości sprężyste

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH** **Właściwości tworzyw - wprowadzenie**

**PODEJŚCIE INŻYNIERSKIE**

Materiał traktowany jest jak „czarna skrzynka” – nie interesuje nas jego charakterystyka a jedynie istniejące zależności funkcyjne

W przypadku parametrów ilościowych (mierzalnych):  
odzew = funkcja (czynników)

Sprowadza się tę zależność do możliwie najprostszych funkcji (modeli) matematycznych, np.:

zależność liniowa -> prawo Hooke'a

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

Stale w danym modelu, charakterystyczne dla danego materiału, określane w ściśle zdefiniowanych warunkach, noszą nazwę stałych materiałowych

NAUKA O MATERIAŁACH VIII: Odkształcanie materiałów – właściwości sprężyste

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---


**AGH** **Właściwości tworzyw - wprowadzenie**

**PODEJŚCIE CHARAKTERYSTYCZNE DLA NAUKI O MATERIAŁACH**

Materiał nie jest traktowany jak „czarna skrzynka”, lecz w myśli nauki o materiałach posiada swoją budowę, wynikającą ze sposobu jego otrzymywania

**PODEJŚCIE CHARAKTERYSTYCZNE DLA NAUKI O MATERIAŁACH**

czynnik  
(czas)



MATERIAŁ  
budowa  
nano  
mikro  
makro

odzew  
(właściwości)

Stale w modelach, charakterystyczne dla danego materiału (stale materiałowe) będą zależeć od jego budowy (sposobu otrzymywania).

NAUKA O MATERIAŁACH VIII: Odkształcanie materiałów – właściwości sprężyste

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH** **Właściwości tworzyw - wprowadzenie**

CZYNNIK:	ODZEW:
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;">ELEKTRO- MAGNETYCZNY</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;">CIEPLNY</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;">MECHANICZNY</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">CHEMICZNY</div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">POLARYZACJA</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">MAGNETYZM</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">PRZEWODNOŚĆ</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">CZĄSTKI WYSOKIEJ ENERGII</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">ROZSZERZALNOŚĆ</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">TOPNIENIE</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">PEŁZANIE</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">ODKSZTAŁCENIE</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">                     ☐ SPRĘŻYSTE                      ☐ PLASTYCZNE                      ☐ ELEKOSPRĘŻYSTE                 </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">DEKOHEZJA</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">                     ☐ KRUCHE                      ☐ PLASTYCZNE                      ☐ DYNAMICZNE                 </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">EROZJA</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">                     KOROZJA                      ☐ GAZOWA                      ☐ CIEPŁA                      ☐ ELEKTROCHEM.                 </div>

NAUKA O MATERIAŁACH VIII: Odkształcanie materiałów – właściwości sprężyste

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH** **Właściwości tworzyw - wprowadzenie**

Podstawowym czynnikiem weryfikującym materiały inżynierskie jest działanie sił (naprężeń)



Naprężenia mogą zmienić wymiary (odkształcenie liniowe, odkształcenie kątowe) lub ciągłość materiału (dekohezja)

NAUKA O MATERIAŁACH VIII: Odkształcanie materiałów – właściwości sprężyste

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH** **Modele odkształcenia**

Nauką opisującą nieniszczące odkształcanie się ciał (w czasie) pod wpływem działania sił jest reologia

- ❑ Reologia opiera się na modelach makroskopowych ciał poddawanych działaniu sił ścinania
- ❑ Modele te w sposób ogólny opisują zachowanie się ciał zarówno odkształcających się postaciowo (ciała sztywne, ciecze) jak i objętościowo (gazy)

W klasyfikacji reologicznej (makroskopowej) jako najbardziej typowe można przyjąć trzy podstawowe modele zachowania się ciał:

- odkształcenie sprężyste,
- odkształcenie plastyczne,
- odkształcenie lepkościowe

NAUKA O MATERIAŁACH VIII: Odkształcanie materiałów – właściwości sprężyste

---

---

---

---

---

---


---

---

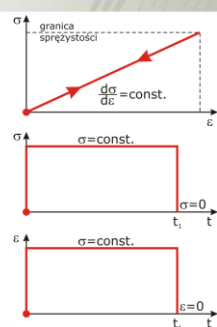
**AGH** **Modele odkształcenia**

Odkształcenia sprężyste (odwracalne)

Ciało liniowo-sprężyste (Hooke'a)



$\sigma = E \cdot \epsilon$



NAUKA O MATERIAŁACH VIII: Odkształcanie materiałów – właściwości sprężyste

---

---

---

---

---

---

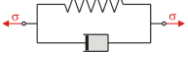
---

---

**AGH Modele odkształcenia**

**Odkształcenia sprężyste (odwracalne)**

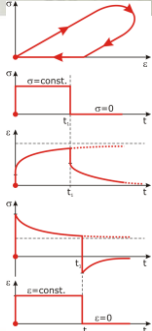
**Ciało o sprężystości opóźnionej (Kelvina)**



$$\sigma = E \cdot \varepsilon + \eta \cdot \frac{d\varepsilon}{dt}$$

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right]$$

$\tau$  - czas relaksacji



NAUKA O MATERIAŁACH VIII: Odkształcanie materiałów – właściwości sprężyste

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH Modele odkształcenia**


**Odkształcenie plastyczne (nieodwracalne)**

**Ciało doskonale plastyczne**

$$\sigma = \sigma_{max}$$

$$\tau = \tau_{max}$$

$\sigma_{max}, \tau_{max}$  - granica plastyczności



NAUKA O MATERIAŁACH VIII: Odkształcanie materiałów – właściwości sprężyste

---

---

---

---

---

---

---

---

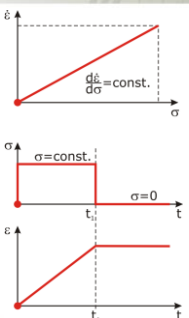
**AGH Modele odkształcenia**

**Odkształcenie lepkościowe**

**Ciecz Newtona**

$$\sigma = \eta \cdot \dot{\varepsilon}$$

$\eta$  - współczynnik lepkości



NAUKA O MATERIAŁACH VIII: Odkształcanie materiałów – właściwości sprężyste

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH Właściwości sprężyste**

Zachowanie się materiałów pod wpływem naprężeń – statyczna próba rozciągania (ściskania, zginania,...)

NAUKA O MATERIAŁACH VIII: Odkształcanie materiałów – właściwości sprężyste

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH Odkształcenie sprężyste**

□ **Odkształcenie wzdłużne**

$$\varepsilon_z = \frac{l_1 - l}{l} = \frac{\Delta l}{l}$$

□ **Odkształcenie poprzeczne:**

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \frac{d_1 - d}{d} = -\frac{\Delta d}{d}$$

□ **Liczba Poissona:**

$$\nu = -\frac{\text{odkształcenie poprzeczne}}{\text{odkształcenie wzdłużne}} = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z}$$

NAUKA O MATERIAŁACH VIII: Odkształcanie materiałów – właściwości sprężyste

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH Odkształcenie sprężyste**

□ **Odkształcenie ścinania:**

$$\frac{w}{l} = \text{tg } \gamma$$

Dla małych odkształceń:  
( $\text{tg } \gamma \approx \gamma$ )

$$\frac{w}{l} \approx \gamma$$

NAUKA O MATERIAŁACH VIII: Odkształcanie materiałów – właściwości sprężyste

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH Odształcenie sprężyste**

□ **Odształcenie objętościowe**

$$\vartheta = \frac{\Delta V}{V} = \frac{V_1 - V_0}{V_0} \approx \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z$$

Odształcenie objętościowe jest równe sumie odkształceń liniowych w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach

NAUKA O MATERIAŁACH VIII: Odształcanie materiałów – właściwości sprężyste

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH Odształcenie sprężyste**

Rzeczywiste zachowanie się materiałów łączy ze sobą elementy zachowania modelowego sprężystego, plastycznego i lepkościowego

MATERIAŁY „KRUCHE”, „PLASTYCZNE”, „LEPKOSPŘĘŻYSTE”

NAUKA O MATERIAŁACH VIII: Odształcanie materiałów – właściwości sprężyste

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH Prawo Hooke’a - moduły sprężystości**

Dla materiałów sztywnych w pierwszym etapie przy rosnących naprężeniach materiały zachowują się sprężysto t.j. odkształcają się nietrwale.  
W pewnym zakresie odkształcenia jest proporcjonalne do naprężenia.

**Prawo Hooke’a**  
 $\sigma = E \cdot \epsilon$   
 $\tau = G \cdot \gamma$   
 $p = -K \cdot \vartheta$

E - moduł Younga (sprężystości podłużnej)  
 G - moduł sztywności (ścianania, spręż. postaciowej)  
 K - moduł ściśliwości (spręż. objętościowej)  
 v - liczba Poissona (odkształcalności poprzecznej)

**Moduły E, G, K i liczba Poissona określają właściwości sprężyste materiałów.**

NAUKA O MATERIAŁACH VIII: Odształcanie materiałów – właściwości sprężyste

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH Prawo Hooke'a - moduły sprężystości**

**Pytania:**

- od czego zależą moduły sprężystości materiałów?
- jak je można określić?
- jak je można zmieniać?

NAUKA O MATERIAŁACH VIII: Odkształcanie materiałów – właściwości sprężyste

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

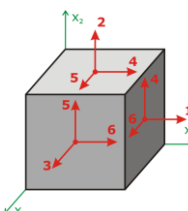
---

---

**AGH Prawo Hooke'a - moduły sprężystości**

Układ trójwymiarowy, Prawo Hooke'a w postaci tensorowej:

$$\sigma_i = C_{ij} \varepsilon_j \quad \text{lub} \quad \varepsilon_i = S_{ij} \sigma_j$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix}$$


Pełna macierz sprężystości – 36 stałych

NAUKA O MATERIAŁACH VIII: Odkształcanie materiałów – właściwości sprężyste

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH Prawo Hooke'a - moduły sprężystości**

Wyższa symetria -> redukcja stałych sprężystości  
Dla materiału izotropowego mamy 3 stałe: **S<sub>11</sub>, S<sub>12</sub>, S<sub>44</sub>**

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{12} & S_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = S_{11}\sigma_1 + S_{12}(\sigma_2 + \sigma_3) \\ \varepsilon_2 = S_{11}\sigma_2 + S_{12}(\sigma_1 + \sigma_3) \\ \varepsilon_3 = S_{11}\sigma_3 + S_{12}(\sigma_1 + \sigma_2) \\ \varepsilon_4 = S_{44}\sigma_4 \\ \varepsilon_5 = S_{44}\sigma_5 \\ \varepsilon_6 = S_{44}\sigma_6 \end{cases}$$

Przy czym:  
 $E = 1/S_{11}$   
 $G = 1/S_{44}$   
 $\nu = -S_{12}/S_{11}$

**Zależność między stałymi materiałowymi:**  
 $E = 2G(1 + \nu)$

$$E = \left( \frac{\partial \sigma_i}{\partial \varepsilon_j} \right)_{i=j=1,2,3}$$

$$G = \left( \frac{\partial \sigma_i}{\partial \varepsilon_j} \right)_{i=j=4,5,6}$$

$$\nu = - \left( \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial \varepsilon_j} \right)_{\sigma_i, \sigma_j}$$

NAUKA O MATERIAŁACH VIII: Odkształcanie materiałów – właściwości sprężyste

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH Prawo Hooke'a - moduły sprężystości**

Porównanie wielkości E dla różnych materiałów na podstawie danych M.F. Ashby'ego

NAUKA O MATERIAŁACH VIII: Odkształcanie materiałów – właściwości sprężyste

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH Właściwości sprężyste układu dwóch atomów**

Odkształcanie sprężyste w układzie dwóch atomów

Uproszczony wykres siły F działającej między dwoma atomami w dwuatomowej cząsteczce jako funkcja ich odległości x

NAUKA O MATERIAŁACH VIII: Odkształcanie materiałów – właściwości sprężyste

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH Właściwości sprężyste układu dwóch atomów**

W modelu rozważamy zależność naprężenia od odkształcenia dla dwu atomów odchylanych od położenia równowagi przez siłę zewnętrzną.

Działania sił zewnętrznych wywołuje wewnętrzną przeciwnie skierowaną reakcję układu

Zakładamy układ izolowany w którym atomy są odchylane od położenia równowagi ( $x_0$ ) na niewielką odległość

$$\sigma = \frac{F}{a} \approx \frac{F}{r_0^2}$$

$$F \sim r$$

$$d\sigma = \frac{1}{r_0^2} \left( \frac{\delta F}{\delta r} \right)_{r=r_0} dr$$

$$\epsilon = \frac{\Delta r}{r_0}$$

$$d\epsilon = \frac{dr}{r_0}$$

$$\int_0^\epsilon d\sigma = \int_0^\epsilon \frac{1}{r_0^2} \left( \frac{\delta F}{\delta r} \right)_{r=r_0} d\epsilon$$

$$\sigma = \frac{1}{r_0} \left( \frac{\delta F}{\delta r} \right)_{r=r_0} d\epsilon$$

NAUKA O MATERIAŁACH VIII: Odkształcanie materiałów – właściwości sprężyste

---

---

---

---

---

---

---

---



**AGH** **Właściwości sprężyste układu dwóch atomów**

$$\sigma = \frac{1}{r_0} \left( \frac{\delta F}{\delta r} \right)_{r=r_0} d\varepsilon$$

$$\sigma = C \cdot \varepsilon$$

gdzie: C - stała sprężystości ~ do modulu sprężystości

Im większa siła wiązania i im krótsze wiązanie tym większy moduł sprężystości materiału.

NAUKA O MATERIAŁACH VIII: Odształcanie materiałów – właściwości sprężyste

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

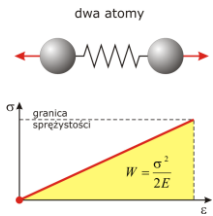
**AGH** **Właściwości sprężyste**

Energia odkształceń sprężystych

Gęstość energii, energia właściwa (ilość energii na jednostkę objętości) w [J/m<sup>3</sup>]

$$W = \int_0^\varepsilon \sigma \cdot \varepsilon \cdot d\varepsilon = \frac{E\varepsilon^2}{2} = \frac{\sigma^2}{2E}$$

Energia jest równa polu pod krzywą  $\sigma$ - $\varepsilon$



NAUKA O MATERIAŁACH VIII: Odształcanie materiałów – właściwości sprężyste

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH** **Odształcanie sprężyste kryształów**

Porównanie wielkości E dla różnych materiałów

Stale materiałowe  $C_{ij}$  oraz moduły E i G [GPa] niektórych monokryształów o strukturze regularnej

Kryształ	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{44}=G$	E
<b>MgO</b>	343	95	124	310
<b>UO<sub>2</sub></b>	395	121	65	338
<b>βSiC</b>	422	140	232	352
<b>C (diament)</b>	1062	125	575	1035
<b>TiC<sub>0,94</sub></b>	519	102	179	486
<b>ZrC<sub>0,94</sub></b>	450	99	153	414

NAUKA O MATERIAŁACH VIII: Odształcanie materiałów – właściwości sprężyste

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH** Właściwości sprężyste mat. wielofazowych

**Model szeregowy**

$$\frac{1}{E} = \frac{V_1}{E_1} + \frac{V_2}{E_2}$$

**Model równoległy**

$$E = V_1 E_1 + V_2 E_2$$

„prawo mieszanin”

**E** - moduł Younga, **V** - udział objętościowy fazy

NAUKA O MATERIAŁACH VIII: Odkształcanie materiałów – właściwości sprężyste

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH** Właściwości sprężyste mat. wielofazowych

**Moduł Younga kompozytów**

kompozyty umacniane cząstkami

NAUKA O MATERIAŁACH VIII: Odkształcanie materiałów – właściwości sprężyste

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH** Właściwości sprężyste materiałów porowatych

Fazę gazową w materiale można traktować jak fazę, dla której stała  $E=0$

Stąd, z prawa mieszanin, moduł Younga materiału porowatego wynosi:

$$E = E_0 (1 - V_p)$$

gdzie:  
 $V_p$  - udział objętościowy porów  
 $E_0$  - moduł Younga materiału gęstego

NAUKA O MATERIAŁACH VIII: Odkształcanie materiałów – właściwości sprężyste

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH Właściwości sprężyste materiałów porowatych**

W rzeczywistych materiałach istnieją różnego rodzaju defekty wewnętrzne które powodują powstawanie **koncentracji naprężeń**.  
 Na skutek tego, lokalnie wewnątrz materiału naprężenia mogą znacznie przewyższać te przyłożone do niego na zewnątrz.

Rozwiązanie Inglisa dla pasma osłabionego otworem eliptycznym:

$$\sigma = \sigma_z \left( 1 + 2 \sqrt{\frac{c}{\rho}} \right)$$

$$\sigma \approx 2\sigma_z \sqrt{\frac{c}{\rho}}$$

$$\rho \ll c$$

NAUKA O MATERIAŁACH VIII: Odkształcanie materiałów – właściwości sprężyste

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH Właściwości sprężyste materiałów porowatych**

Makroskopowe zachowanie materiału jest ściśle związane z jego mikrostrukturą, którą można scharakteryzować poprzez:

- Wymiary i kształt ziaren,
- Strukturę defektów wewnętrznych:
  - elektronowych,
  - atomowych punktowych (wakancje),
  - liniowych (dyslokacje krawędziowe i śrubowe),
  - powierzchniowych (granice ziaren, bliźniaki krystaliczne, granice faz, mikropęknięcia),
  - objętościowych (**pory, pustki, inkluzje**)

NAUKA O MATERIAŁACH VIII: Odkształcanie materiałów – właściwości sprężyste

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH Właściwości sprężyste mat. porowatych**

Ogólnie:

$$\sigma = k \cdot \sigma_z$$

gdzie:  $k$  - współczynnik koncentracji naprężeń

Stąd:

$$E = E_0 \cdot (1 - k \cdot V_p)$$

Na przykład dla porów eliptycznych wzór wynikający z hipotezy Rossiego:

$$k = \frac{5}{4} \cdot \frac{a}{c} + \frac{3}{4}$$

Względny moduł

Udział objętościowy porów

NAUKA O MATERIAŁACH VIII: Odkształcanie materiałów – właściwości sprężyste

---

---

---

---

---

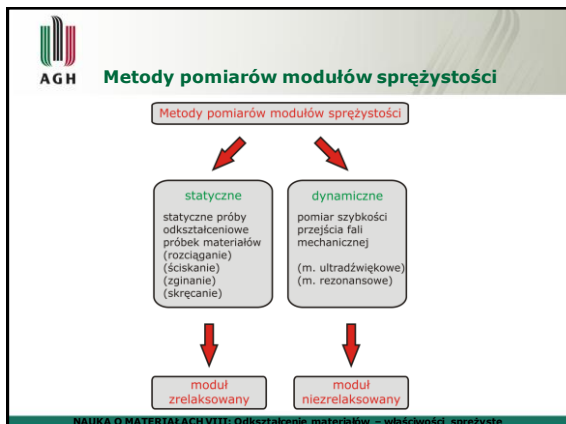
---

---

---

---

---




---

---

---

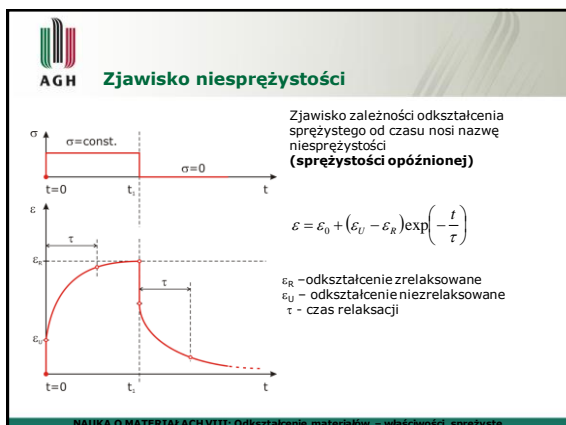
---

---

---

---

---




---

---

---

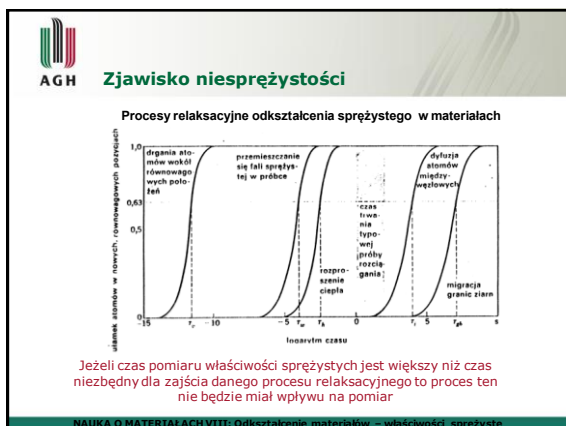
---

---

---

---

---




---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH Zjawisko niesprężystości**

$E_{niezrelaksowany} \geq E_{zrelaksowany}$

$$\epsilon = \left( \frac{\sigma_0}{E_R} \right) + \left[ \left( \frac{\sigma_0}{E_U} \right) - \left( \frac{\sigma_0}{E_R} \right) \right] \exp\left( -\frac{t}{\theta} \right)$$

a)  $\frac{t}{\tau} \rightarrow 0 \quad \epsilon \approx \frac{\sigma_0}{E_U}$

b)  $\frac{t}{\tau} \rightarrow \infty \quad \epsilon \approx \frac{\sigma_0}{E_R}$

NAUKA O MATERIAŁACH VIII. Odkształcanie materiałów – właściwości sprężyste

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH** AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA  
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

**NAUKA O MATERIAŁACH**

**Dziękuję.**

JERZY LIS  
Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki  
Katedra Technologii Ceramiki i Materiałów Ogniotrwałych

---

---

---

---

---

---

---

---