



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA  
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

## NAUKA O MATERIAŁACH

**Wykład XV: Odporność materiałów na zniszczenie**

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

---

---

---

---

---

---

---

---



**Treść wykładu:**

1. Zmęczenie materiałów
2. Tarcie i jego skutki
3. Udar i próby udarowości
4. Zniszczenie balistyczne
5. Erozja cząstkami wysokiej energii



NAUKA O MATERIAŁACH XV: Odporność materiałów na zniszczenie

---

---

---

---

---

---

---

---



**Zmęczenie materiałów**

**Zmęczenie**  
Zmęczeniem materiałów nazywamy zmiany zachodzące w tworzywie pod wpływem zmiennych, niekiedy okresowych naprężeń, niższych niż granica plastyczności ujawniających się zmniejszeniem wytrzymałości lub zniszczeniem.  
Zmęczenie jest najczęstszą przyczyną niszczenia metali stosowanych do wytwarzania części maszyn.  
Badania zmęczenia przeprowadza się poddając materiał cyklicznym naprężeniom o zmiennej częstotliwości lub/i amplitudzie.



NAUKA O MATERIAŁACH XV: Odporność materiałów na zniszczenie

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH Zmęczenie materiałów**

**Rodzaje naprężeń zmęczeniowych**

NAUKA O MATERIAŁACH XV. Odporność materiałów na zmęczenie

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH Zmęczenie materiałów**

**Nieograniczona wytrzymałość zmęczeniowa** to maksymalna wartość (amplituda\*) naprężenia cyklicznego  $\sigma_{max}$  dla dla którego pomimo zwiększenia ilości cykli nie następuje zniszczenie zmęczeniowe materiału.  
 \*W przypadku obciążenia wahadłowego  $\sigma_{max} = \sigma_a$  (amplituda).

**Wykres zmęczeniowy Wöhlera**

**Z<sub>G</sub>** – granica wytrzymałości zmęczeniowej

**N<sub>G</sub>** – graniczna liczba cykli zmęczeniowych:

- dla stali konstrukcyjnych  $N_G \approx 1 \cdot 10^7$  cykli,
- dla metali i stopów nieżelaznych  $N_G \approx 2 \cdot 10^7 \div 1 \cdot 10^8$  cykli

NAUKA O MATERIAŁACH XV. Odporność materiałów na zmęczenie

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH Zmęczenie materiałów**

**Mechanizmy zniszczenia zmęczeniowego**  
 Wzrost istniejących spękań wskutek łączenia się defektów i pustek przed czołem spękania.

NAUKA O MATERIAŁACH XV. Odporność materiałów na zmęczenie

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH Zmęczenie materiałów**

**Mechanizmy zniszczenia zmęczeniowego**  
 Rozrost spękań powierzchniowych wzdłuż płaszczyzn poślizgu.

NAUKA O MATERIAŁACH XV. Odporność materiałów na zniszczenie

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH Zmęczenie materiałów**

- Pęknięcie zmęczeniowe zostaje zapoczątkowane w miejscach defektów powierzchniowych lub koncentracji naprężeń (ogniska zmęczeniowe) i rozprzestrzenia się stopniowo w materiale.
- Przelam zmęczeniowy ma charakterystyczny obraz powierzchni
- Im bardziej kruchy materiał tym bardziej narażony jest na zmęczenie

Schemat cech powierzchni złomu zmęczeniowego według S. Kocarydy:

1. ognisko,
2. strefa przyogniskowa,
3. uskoki pierwotne,
4. uskoki wtórne,
5. linie zmęczeniowe,
6. strefa przejściowa,
7. strefa resztkowa,
8. kierunek obrotu wału

Fatigue fracture of a compressor connecting rod

NAUKA O MATERIAŁACH XV. Odporność materiałów na zniszczenie

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH Zmęczenie materiałów**

**B. Ceramika**

Materiały kruche są bardzo mało odporne na zmęczenie. Zjawiska te związane są ze zmniejszaniem się  $K_{IC}$  może zwiększać korozja gazowa, chemiczna lub pełzanie powodując zwiększanie się wielkości defektów w materiale

Korozja szkła

Pełzanie ceramiki

NAUKA O MATERIAŁACH XV. Odporność materiałów na zniszczenie

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH Zmęczenie materiałów**

- **Zależność szybkości spękań od  $K_{Ic}$**
- Występuje minimalna wartość  $K_{I0}$  – granica zmęczenia statycznego

NAUKA O MATERIAŁACH XV. Odporność materiałów na zmęczenie

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH Tarcie i jego skutki**

- **Ścieranie**

- Przemieszczenie stykających się powierzchni materiałów wywołuje siłę oporu nazywaną tarcie przy czym wielkość tarcia zależy od:
 
$$T = \mu N$$
 gdzie: T - siła tarcia statycznego lub kinetycznego (dynamicznego);  
 N - nacisk,  
 $\mu$  - współczynnik tarcia statycznego (rzędu 0.5) lub dynamicznego (mniejszy)
- Wartość współczynnika tarcia zależy od rodzaju i stanu powierzchni.
- Tarcie i jego skutkami zajmuje się **tribologia** (tribos = tarcie)
- **Podczas tarcia następuje zużycie powierzchni - ścieranie**

NAUKA O MATERIAŁACH XV. Odporność materiałów na zmęczenie

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH Tarcie i jego skutki**

układ statyczny  $v=0$

układ kinetyczny  $v=const.$

powierzchnie styku

NAUKA O MATERIAŁACH XV. Odporność materiałów na zmęczenie

---

---

---

---

---

---

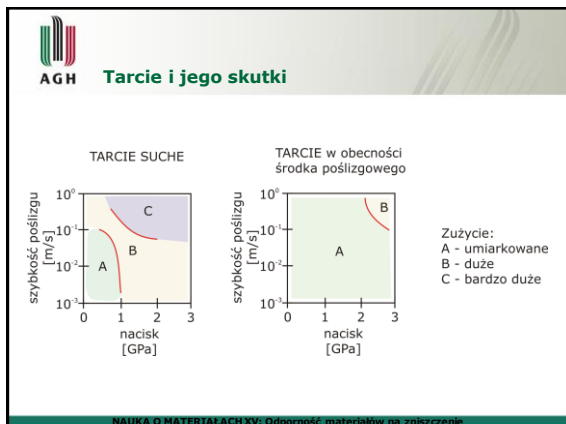
---

---

---

---






---

---

---

---

---

---

---

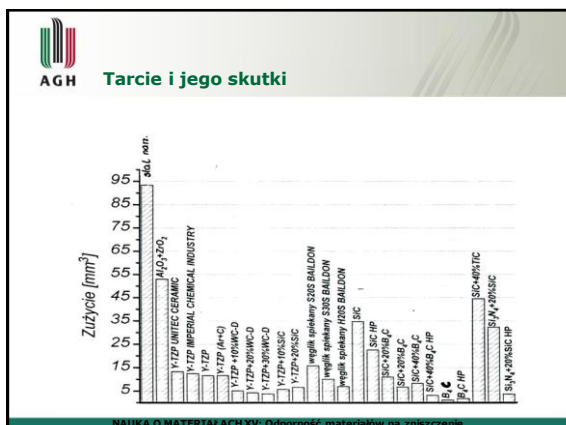
---

---

---

---

---




---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH Udar i próby udamności**

**Udar**

Znormalizowaną miarą odporności na zniszczenie w warunkach dynamicznych jest udamność mierzona wartością pracy zużytej na dynamiczne złamanie próbki o znormalizowanych wymiarach

$$KC = K/A \text{ [J/cm}^2\text{]}$$

K – praca zniszczenia  
 A- powierzchnia

Przykład:  
 Młot wahadłowy Charpiego

NAUKA O MATERIAŁACH XV. Odporność materiałów na zniszczenie

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---



**AGH Zniszczenie balistyczne**

Pancerze ceramiczne o grubości 100 mm zastępują ok. 500mm RHA a w układzie kompozytowym zwiokrotniają ochronę o dalsze 2-3 razy.

**Działanie pancerza ceramicznego**

1. Zniszczenie (stępienie pocisku) = wysoka twardość
2. Zmiana kierunku pocisku (odbicie)
3. Pochłanianie energii w wyniku kruchego rozpadu na części (fragmentacja, piaskowanie)

**Najbardziej skuteczne są twarde i wytrzymałe materiały węglikowe i borkowe**

NAUKA O MATERIAŁACH XV. Odporność materiałów na zniszczenie

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH Zniszczenie balistyczne**

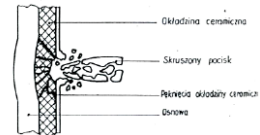

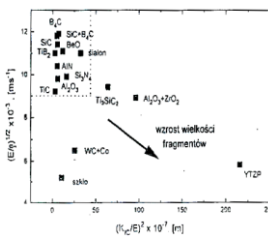




Diagram labels: Okładzina ceramiczna, Skruszony pocisk, Resztki oksydów ceramicznych, Osłona

Scatter plot axes:  $(\sigma_{dy} / \sigma_s) \times 10^3$  [MPa] vs.  $(E_{dy} / E_s) \times 10^3$  [GPa]

Scatter plot materials:  $B_4C$ ,  $SiC$ ,  $SiC-B_4C$ ,  $Ti_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $Si_3N_4$ ,  $AlN$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Ti_3SiC_2$ ,  $WC-Co$ ,  $Al_2O_3-ZrO_2$ ,  $YSZ$ ,  $SiAlO$

Scatter plot note: wzrost wielkości fragmentów

NAUKA O MATERIAŁACH XV. Odporność materiałów na zniszczenie

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH Zniszczenie balistyczne**




Przykłady symulacji numerycznych zniszczenia balistycznego

NAUKA O MATERIAŁACH XV. Odporność materiałów na zniszczenie

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---



**AGH Zniszczenie balistyczne**

Obraz Rtg przebijania pocisku (pancerza?)  
 a,b,c - metalowego  
 d - ceramicznego

NAUKA O MATERIAŁACH XV. Odporność materiałów na zniszczenie

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH Zniszczenie balistyczne**

Model ceramicznego panelu antybalistycznego dla Rosomaka

NAUKA O MATERIAŁACH XV. Odporność materiałów na zniszczenie

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH Zniszczenie balistyczne**

**Nanolaminaty – ceramika plastyczna**

Materiały o wysokiej odporności balistycznej

NAUKA O MATERIAŁACH XV. Odporność materiałów na zniszczenie

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH Zniszczenie balistyczne**

<http://www.ujp.cz/>

<http://poligon-14.blog.onet.pl/>

NAUKA O MATERIAŁACH XV: Odporność materiałów na zniszczenie

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH Erozja cząstkami wysokiej energii**

**Erozja cząstkami**

- ❑ Materiały mogą pracować w warunkach oddziaływania strumienia cząstek np. strumień gorących gazów piecowych, cząstki w kosmosie i in.
- ❑ W tych warunkach następuje degradacja (erozja) materiału wskutek uderzeń cząstek.
- ❑ Najczęściej erozja połączona jest z korozją chemiczną (gazową lub ciekłą) wskutek oddziaływania agresywnego medium.

NAUKA O MATERIAŁACH XV: Odporność materiałów na zniszczenie

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH Erozja cząstkami wysokiej energii**

Cząstki (elementy nie spalone, krzemionka, pył, i in.) o małych wymiarach rzędu  $\mu\text{m}$  i dużej prędkości do setek  $\text{km/h}$  uderzają o powierzchnię materiału.

Schemat zderzenia sztywnej cząstki z powierzchnią materiału

Praca uderzenia:

- odkształcenie
- wyrwanie
- spekanie

NAUKA O MATERIAŁACH XV: Odporność materiałów na zniszczenie

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH Erozja cząstkami wysokiej energii**

**Złożone zjawiska erozji i korozji**  
np. wykładzina w kominie elektrowni

- erozja mechaniczna,
- sublimacja,
- utlenianie,
- utlenianie z pasywacją.

NAUKA O MATERIAŁACH XV: Odporność materiałów na zniszczenie

---

---

---

---

---

---

---

---

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

**NAUKA O MATERIAŁACH**

**Dziękuję.**

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

---

---

---

---

---

---

---

---