



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

NAUKA O MATERIAŁACH

Wykład XV: Odporność materiałów na zniszczenie

JERZY LIS
Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki



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

Diagram illustrating various types of stress cycles: **jednostronne (ujemne)**, **jednostronne (dodatnie)**, **wahadłowe (symetryczne)**, and **dwustronne**. A secondary graph shows stress amplitude ($\Delta\sigma$) and mean stress (σ_m) for a cycle.

NAUKA O MATERIAŁACH XV. Odporność materiałów na zniszczenie

AGH Zmęczenie materiałów

Nieograniczona wytrzymałość zmęczeniowa to maksymalna wartość (amplituda*) naprężenia cyklicznego σ_{max} , dla którego pomimo zwiększenia ilości cykli nie następuje zniszczenie zmęczeniowe materiału.

*W przypadku obciążenia wahadłowego $\sigma_{max} = \sigma_a$ (amplituda).

Wykres zmęczeniowy Wöhlera

Wykres zmęczeniowy Wöhlera przedstawia zależność naprężenia (σ) od liczby cykli (N). Krzywa **a** dotyczy stali, a krzywa **b** dotyczy metali i stopów nieżelaznych. Granica wytrzymałości zmęczeniowej (Z_G) jest wyznaczona dla N_G .

Z_G – granica wytrzymałości zmęczeniowej

N_G – 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 zniszczenie

AGH Zmęczenie materiałów

Mechanizmy zniszczenia zmęczeniowego

Wzrost istniejących spękań wskutek łączenia się defektów i pustek przed czołem spękania.

Diagram przedstawia mechanizm zniszczenia zmęczeniowego, w tym tworzenie nowej powierzchni i łączenie defektów i pustek przed czołem spękania.

NAUKA O MATERIAŁACH XV. Odporność materiałów na zniszczenie

AGH Zmęczenie materiałów

Mechanizmy zniszczenia zmęczeniowego
 Rozrost spękań powierzchniowych wzdłuż płaszczyzn poślizgu.

NAUKA O MATERIAŁACH XV: Odporność materiałów na zniszczenie

AGH Zmęczenie materiałów

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

Schemat cech powierzchni złomu zmęczeniowego według S. Kocaińdy:

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

Prędkość wzrostu pęknięć, lg a

Współczynnik intensywności naprężeń, lg K_I

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,
 μ - 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 Tarcie i jego skutki

Mechanizmy zużycia tribologicznego

A) Zużycie ściernie – przy nierównych powierzchniach

Model dynamiczny elementarnych procesów zużycia:

- a) brzdowanie,
- b) ścinanie nierówności,
- c) ścinanie nierówności ścierniwem przez występ nierówności,
- d) okształcanie plastyczne materiału

NAUKA O MATERIAŁACH XV: Odporność materiałów na zniszczenie

AGH Tarcie i jego skutki

B. Zużycie adhezyjne

Następuję adhezja gładkich powierzchni i wrywanie cząstek materiału mniej odpornego

C. Zużycie przez utlenianie lub spajanie

Tarcie i ścieraniu towarzyszy wydzielanie się ciepła. Możliwy jest bardzo wysoki wzrost temperatury aż do utleniania powierzchni, reakcji z materiałem chłodzącym czy spajanie powierzchni.

NAUKA O MATERIAŁACH XV: Odporność materiałów na zniszczenie

AGH Tarcie i jego skutki

Metody badania ścieralności

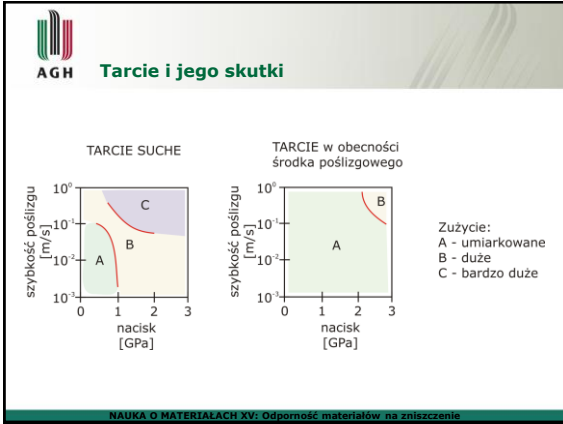
W znormalizowanych warunkach: wielkość próbki, nacisk, czas (ilość cykli) bada się zużycie powierzchni materiału mierzone stratą masy (lub inne np. badanie płytek ceramicznych).

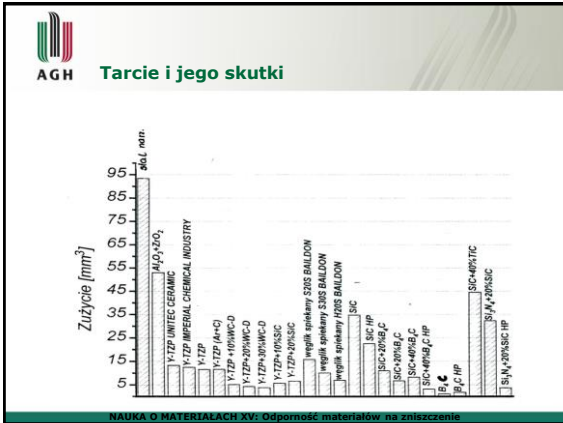
metoda próbka-tarcza

Proszek SiC 215-350 µm
wałeczek
próbka
www.testlab.com.pl

metoda gumowego walca

NAUKA O MATERIAŁACH XV: Odporność materiałów na zniszczenie





Udar

Znormalizowaną miarą odporności na zniszczenie w warunkach dynamicznych jest uderność 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 **Udar i próby udarowości**

Szybkość młota – 5-7 m/s
 Energia młota – 300J

Dla stali KCU = 600 kJ/m²
 Dla szkła KC=1.5 KJ/m

Próbki metaliczne z karem

Próbki ceramiczne

<http://www.e2pro.us/>

NAUKA O MATERIAŁACH XV: Odporność materiałów na zniszczenie

AGH **Zniszczenie balistyczne**

Odporność balistyczna

Działanie czynników wysokiej energii (pociski, fala detonacyjna wybuchu) wymaga stosowania materiałów o wysokiej odporności balistycznej. Odporność tę mierzymy **minimalną grubością warstwy która nie ulega zniszczeniu**.

Tradycyjne materiały metaliczne (stal pancerna RHA) nie stanowi zapory dla nowoczesnych pocisków przeciwpancernych podkalibrowych (KE) zawierających rdzeń uranowy czy kumulacyjnych (HEAT) o bardzo wysokiej energii.

Przykłady pocisków przeciwpancernych

Nazwa	Kaliber [mm]	Masa [g]	Prędkość [m/s]	Energia [kJ]	Przebiecie RHA [mm]
B-32	12,7	32	820	10,8	25 (1m)
KE	35	280	1385	490	1000 (1m)
HEAT	40	230	1241	7,15	1500 (1m)
KE	100	3030	1800	3030	300 (2km)
KE	125	4100	1700	5580	600 (2km)

NAUKA O MATERIAŁACH XV: Odporność materiałów na zniszczenie

AGH **Zniszczenie balistyczne**

Odporność balistyczna

Nowoczesne konstrukcje panczerzy to wielowarstwowe elementy kompozytowe zawierające warstwy ceramiczne, metaliczne i polimerowe (aramid).

Zastosowanie: panczerze czołgów i BWP, samochody opancerzone, kamizelki, ochrony urządzeń i in.

funkcja:

Pancerz aktywny "ERAWA" mekka ceramika	uniwersalny panczer ceramiczny			
	Moduł Younga E średni	Moduł Younga E wysoki	Moduł Younga E wysoki	Moduł Younga E dowolny
Twardość H wysoka	Twardość H wysoka	Twardość H dowolna	Twardość H dowolna	Twardość H dowolna
Odporność na kruche pękanie K _c średnia	Odporność na kruche pękanie K _c niska	Odporność na kruche pękanie K _c wysoka	Odporność na kruche pękanie K _c wysoka	Odporność na kruche pękanie K _c wysoka
Al ₂ O ₃	SiC, Al ₂ O ₃ , B ₄ C, TiB ₂	Ti, SiC, kompozyty ceramiczne na bazie Si, N lub ZrO ₂	lekki metal lub polimer wysokoudarowy	
osłabienie działania pocisku	odchylenie toru i stopniowanie ostrza pocisku	fragmentacja "płaskowanie" pochłanianie energii	pękanie na większe fragmenty zatrzymanie pocisku	

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 zwielokrotniają ochronę o dalsze 2-3 razy.

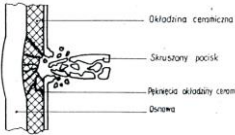

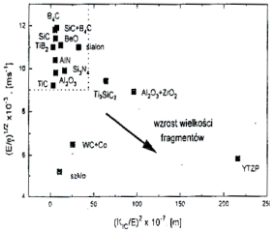
Działanie pancerza ceramicznego

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

NAUKA O MATERIAŁACH XV: Odporność materiałów na zniszczenie

AGH Zniszczenie balistyczne




<http://www.swri.org> <https://str.lnl.gov>

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

(a) Ti_2SiC_2 , Ti_2AlC_2 (b)

$Ti_2SiC_2 - TiC$ wysokość 22 μm

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

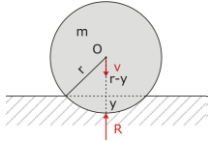
- ❑ Materiały mogą pracować w warunkach oddziaływania strumienia cząstek np. strumień gorących gazów piecowych, cząstki w kosmosie i in.
- ❑ W tych warunkach następuje degradacja (erozja) materiału wskutek uderzeń cząstek.
- ❑ Najczęściej erozja połączona jest z korozją chemiczną (gazową lub ciekłą)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

NAUKA O MATERIAŁACH XV: Odporność materiałów na zniszczenie

AGH Erozja cząstkami wysokiej energii

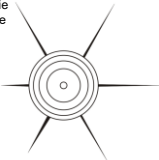
Cząstki (elementy nie spalone, krzemionka, pył, i in.) o małych wymiarach rzędu μm i dużej prędkości do setek km/h uderzają o powierzchnię materiału.

Schemat zderzenia sztywnej cząstki z powierzchnią materiału



Praca uderzenia:

- odkształcenie
- wyrwanie
- spękanie



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 **Zapraszam na egzamin**

1. Egzamin będzie w dniu 24.06.22 (piątek) o godz. 10.00 w trybie stacjonarym. Mogą przystąpić jedynie osoby posiadające zaliczenia z seminarium i laboratorium
2. Sale:
 - Aula B8 studenci kierunku TCH i C
 - Sala 01 B6 studenci IM.
3. Wszyscy dostaną wydrukowane 4 kartki z pytaniami po 3 pytania na kartce. Należy pisać tylko na podanych kartkach.
4. Podział na 2 grupy A i B czas 90 minut.
5. Wyniki w USOS 27.06.22.
6. 28.06.22 II część egzaminu ustna dodatkowa dla wyznaczonych lub tych, którzy chcą poprawić (można pogorszyć !!!)

POWODZENIA 😊

NAUKA O MATERIAŁACH XV: Odporność materiałów na zniszczenie

AGH AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STĄSZCZA W KRAKOWIE

NAUKA O MATERIAŁACH

**Dziękuję
i do zobaczenia
na egzaminie.**

JERZY LIS
Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki
