



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Integralność konstrukcji

Wykład Nr 1

Mechanizm pękania

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
Katedra Wytrzymałości, Zmęczenia Materiałów i Konstrukcji

Konspekty wykładów dostępne na stronie:

<http://zwmik.imir.agh.edu.pl/Dydaktyka/IMIR/index.htm>

Sala seminaryjna:

015/3, łącznik B3-B4, niski parter

1.1. Mechanizmy utraty integralności materiału

- ❑ **Utrata integralności (zniszczenie)** – całkowita (zwykle w bardzo krótkim czasie) utrata spójności przez przełamanie na dwie lub więcej części.

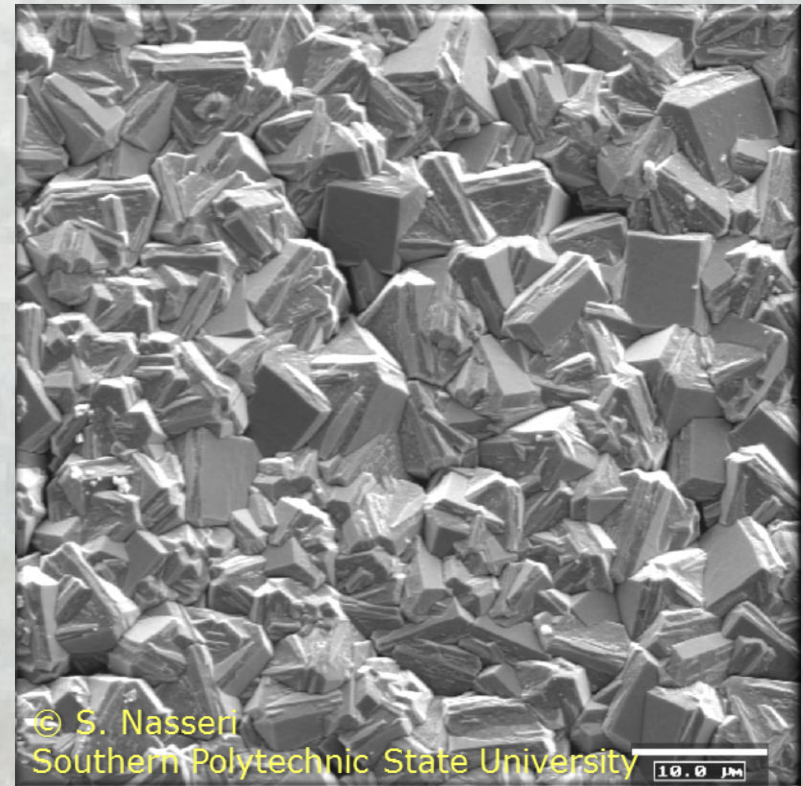
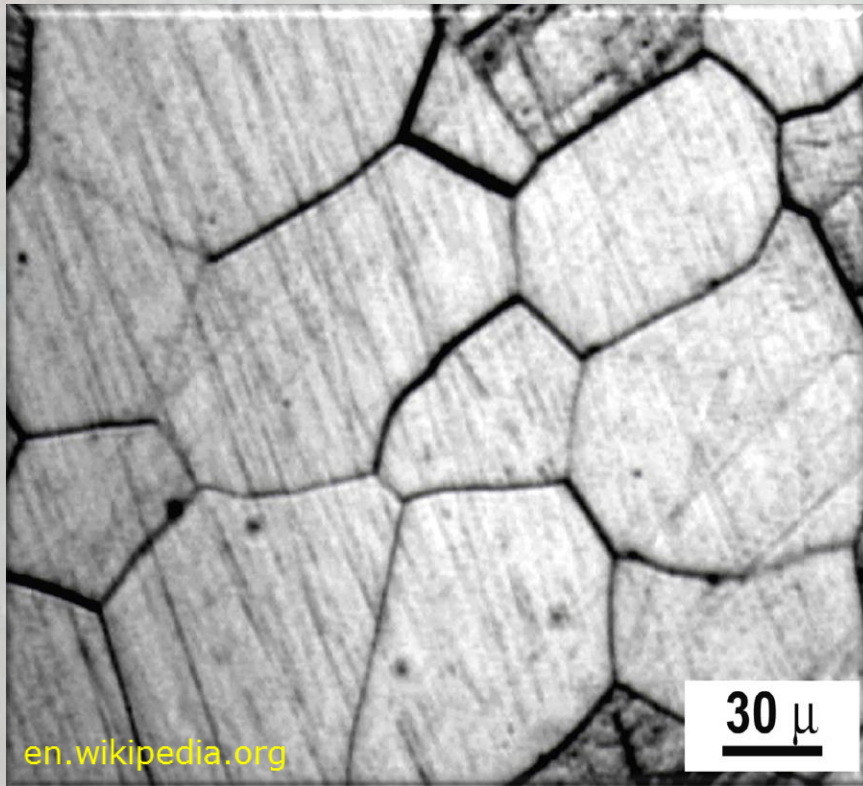
- ❑ **Utrata integralności statystycznie** (National Institution of Standards and Technology, USA, 1983):
 - 80 % ogólnej liczby zniszczeń to zniszczenia zmęczeniowe:
 - ogólny koszt zniszczeń = 4% produktu narodowego USA,
 - koszt zniszczeń, gdzie zmęczenie było decydujące = 3% produktu narodowego USA

- ❑ **Przyczyny utraty integralności:**
 - większość przypadków: niewykryta wada lub rozwój pęknięcia (inicjacja: wady lub karby)
 - Bardzo rzadko: nieprzewidywalne przeciążenie konstrukcji bez wad lub pęknięć

1.2. MIKROMECHANIZM PĘKANIA ZMĘCZENIOWEGO W METALACH INŻYNIERSKICH

1.2.1 Struktura metali.

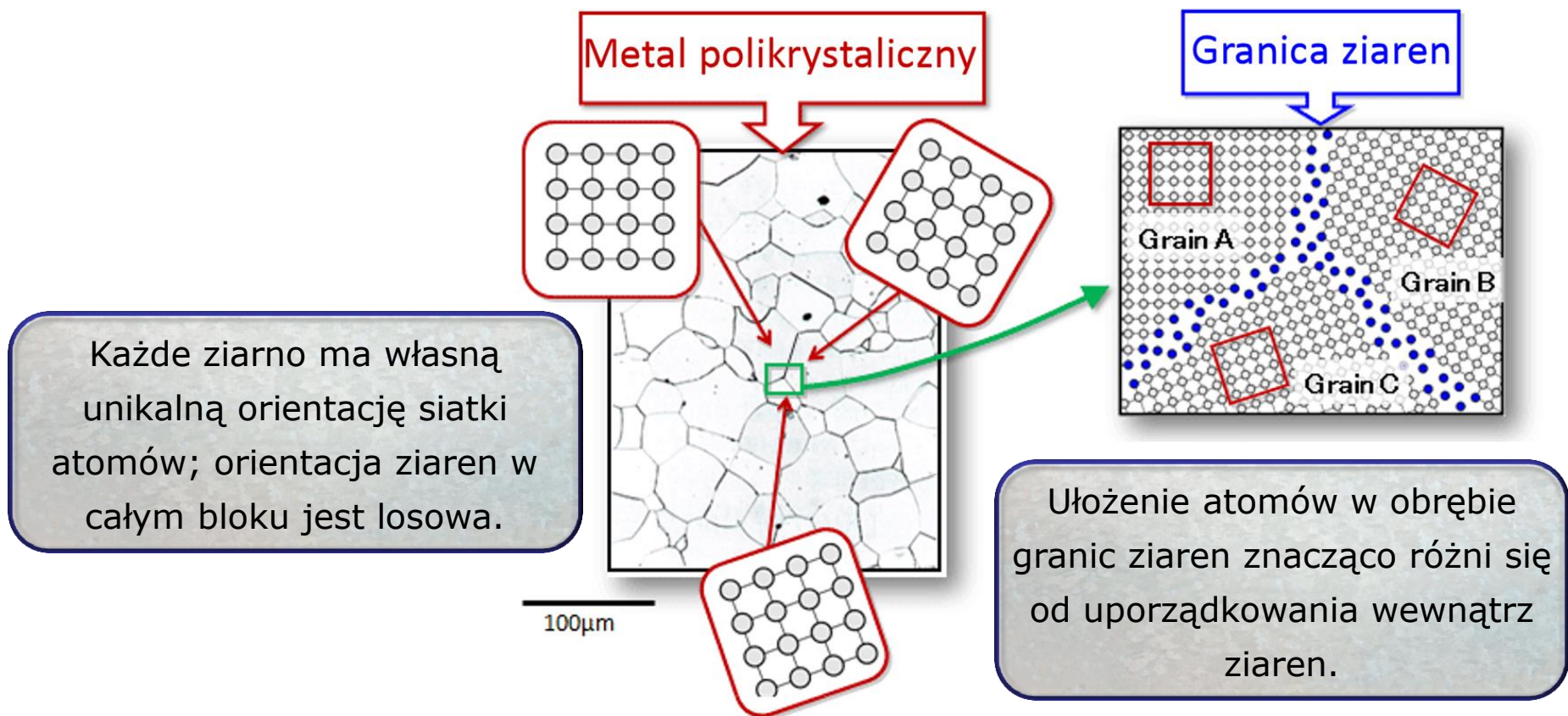
- ❑ Polikrystaliczna: krystaliczne ziarna o wymiarach $1\mu\text{m}$ - 10 mm (kryształy) oddzielone granicami



1.2. MIKROMECHANIZM PĘKANIA ZMĘCZENIOWEGO W METALACH INŻYNIERSKICH

1.2.1 Struktura metali.

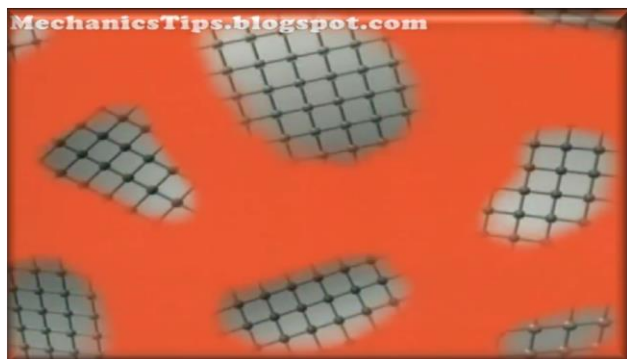
- Polikrystaliczna: krystaliczne ziarna o wymiarach $1\mu\text{m}$ - 10 mm (kryształy) oddzielone granicami



1.2. MIKROMECHANIZM PĘKANIA ZMĘCZENIOWEGO W METALACH INŻYNIERSKICH

1.2.1 Struktura metali.

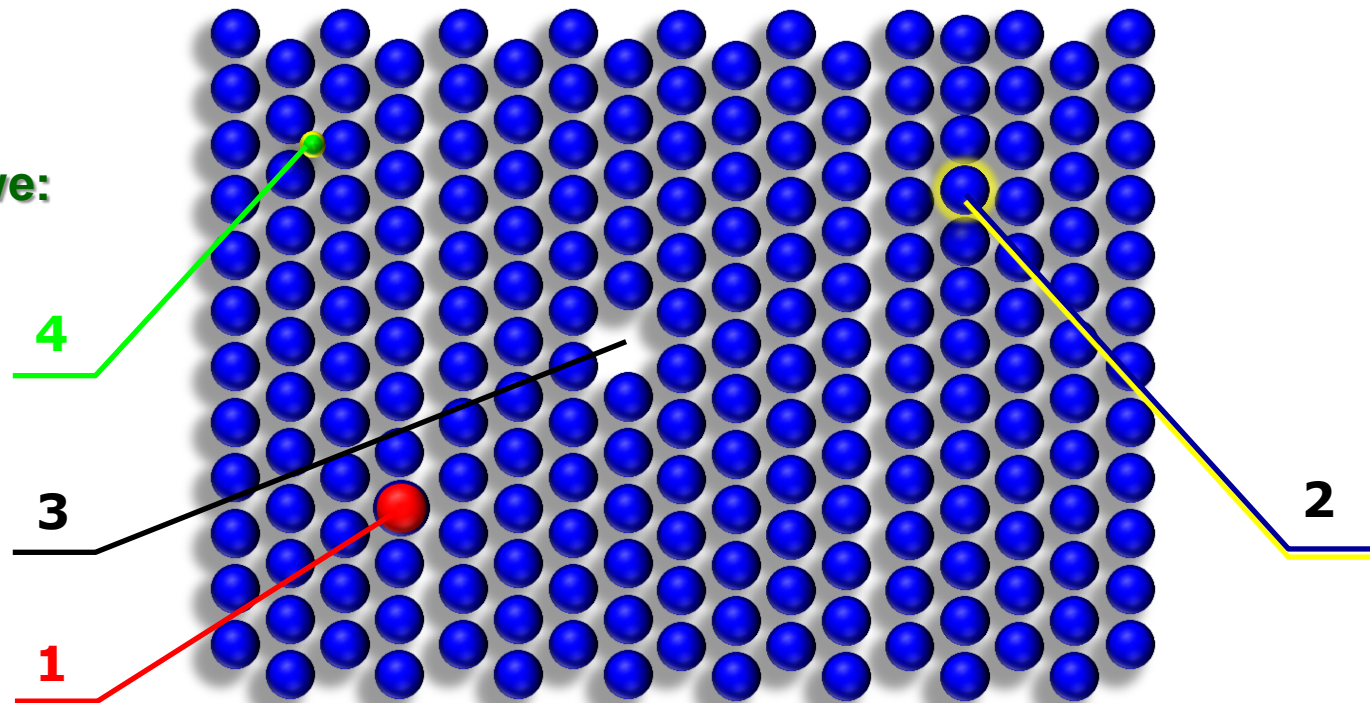
- Mechanizm powstawanie struktury polikrystalicznej w trakcie krzepnięcia metali



1.2.1 Struktura metali.

Defekty kryształów:

Defekty punktowe:



Rys. 1.1. Cztery typy defektów punktowych wewnątrz ziaren w sieci krystalicznej metalu:

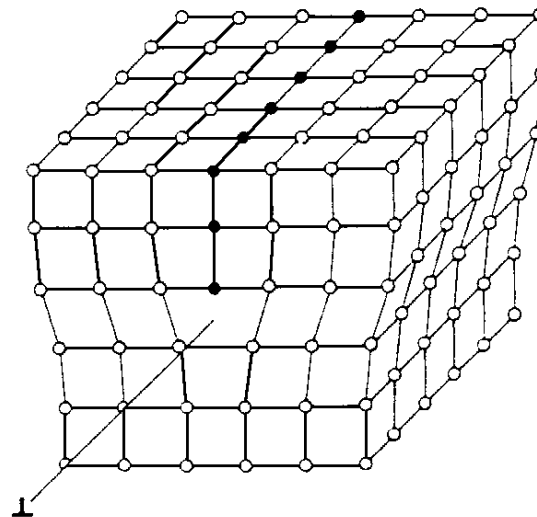
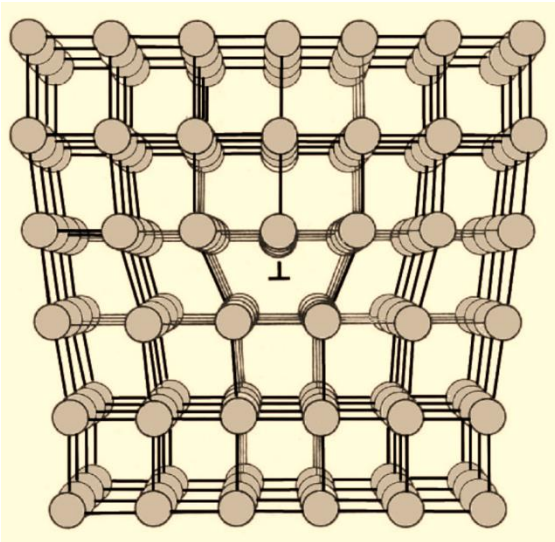
- 1 - atom obcego pierwiastka zamiast atomu właściwego,
- 2 - własny atom międzywęzłowy;
- 3 - wakans (brak atomu);
- 4 - atom międzywęzłowy obcego pierwiastka.

1.2.1 Struktura metali.

☐ Defekty kryształów:

➤ Defekty liniowe:

(a) **Dyslokacje krawędziowe** – krawędź **ekstrapłaszczyzny**, tj. półpłaszczyzny sieciowej umieszczonej między rozsuniętymi płaszczyznami kryształu o budowie prawidłowej.



Rys. 1.2. a)
Dyslokacja krawędziowa.

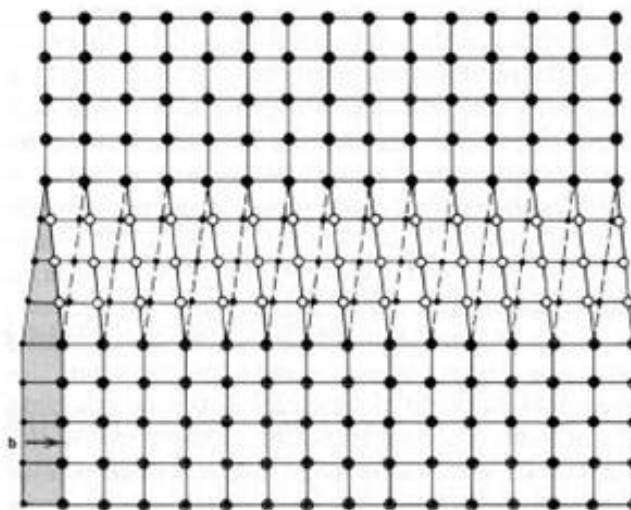
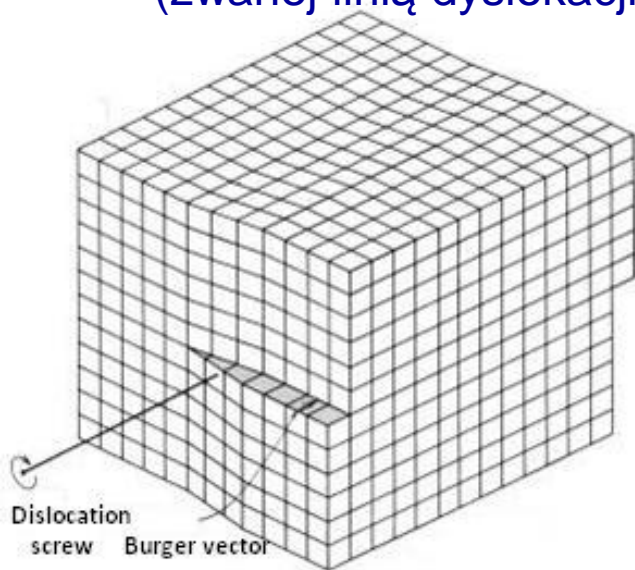
1.2. MIKROMECHANIZM PĘKANIA ZMĘCZENIOWEGO W METALACH INŻYNIERSKICH

1.2.1 Struktura metali.

□ Defekty kryształów:

➤ Defekty liniowe:

(b) **Dyslokacje śrubowe** – defekt liniowy struktury krystalicznej spowodowany przemieszczeniem części kryształu wokół osi (zwanej linią dyslokacji śrubowej).



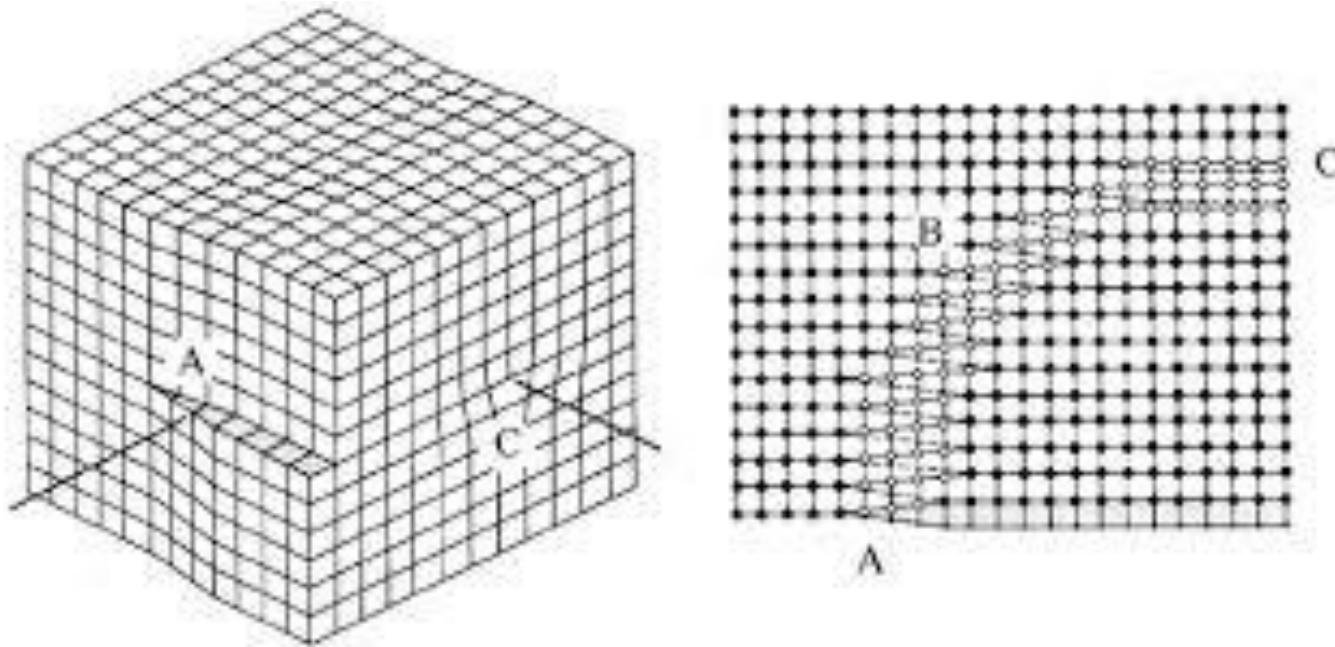
<http://chemistry.tutorvista.com/inorganic-chemistry/crystal-defects.html>

Rys. 1.2. b) Dyslokacja śrubowa.

1.2.1 Struktura metali.

☐ Defekty kryształów:

- Defekty liniowe:
(c) Dyslokacje kombinowane

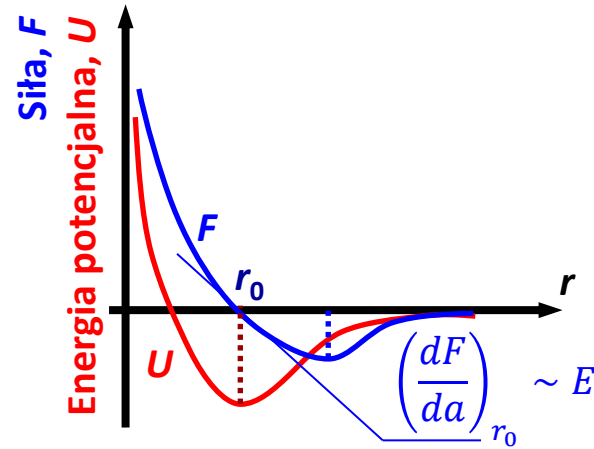
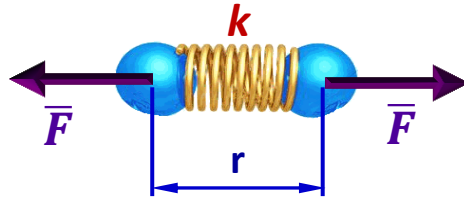


Rys. 1.2. c) Dyslokacja kombinowana.

1.2. MIKROMECHANIZM PĘKANIA ZMĘCZENIOWEGO W METALACH INŻYNIERSKICH

1.2.2. Odkształcenia wewnątrz kryształów

- Odkształcenia sprężyste – naciągnięcie, ale nie przerwanie wiązań atomowych znika po usunięciu obciążenia,



- Odkształcenia plastyczne – zerwanie wiązań atomowych w wyniku których atomy zyskują nowych sąsiadów.

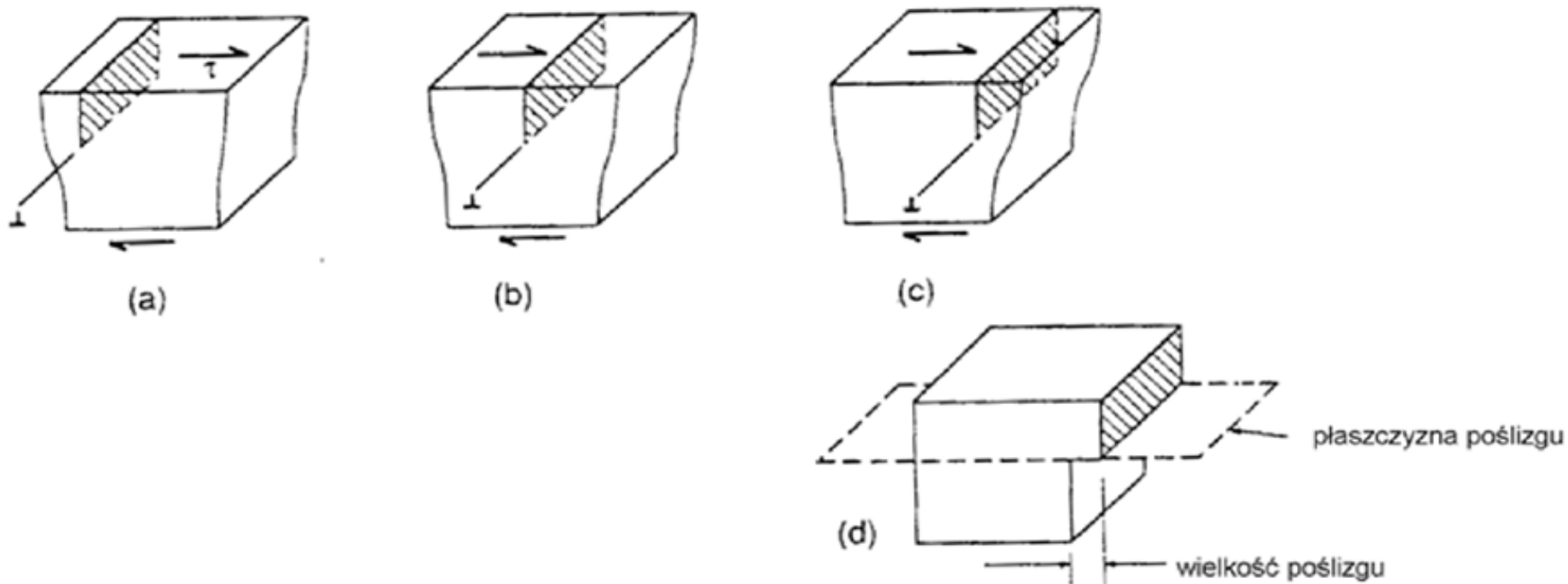
Uwaga: nie występują w całej objętości kryształu, lecz jako ruch dyslokacji najdogodniej zorientowanych względem τ_{\max} .

Konsekwencja: zerwane tylko niektóre wiązania atomowe.

Naprężenia – do 10^4 razy niższe, niż konieczne do deformacji plastycznej idealnego kryształu, tj. do zniszczenia wszystkich wiązań atomowych.

1.2.2. Inicjacja pęknięć zmęczeniowych

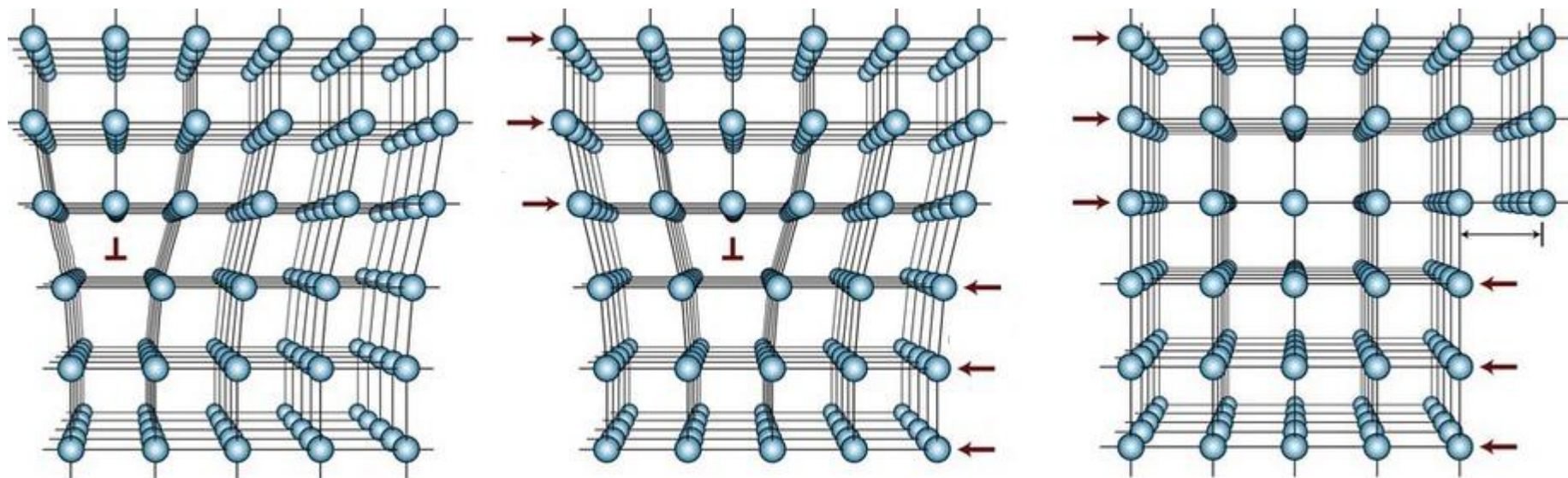
- Pasma poślizgu – regiony szczególnej koncentracji dyslokacji. Pasma poślizgu są przedzielone obszarami mniejszej deformacji plastycznej.



Rys. 1.3. Schemat poślizgu spowodowanego przez ruch dyslokacji krawędziowej.

1.2.2. Inicjacja pęknięć zmęczeniowych

- Pasma poślizgu – regiony szczególnej koncentracji dyslokacji. Pasma poślizgu są przedzielone obszarami mniejszej deformacji plastycznej.

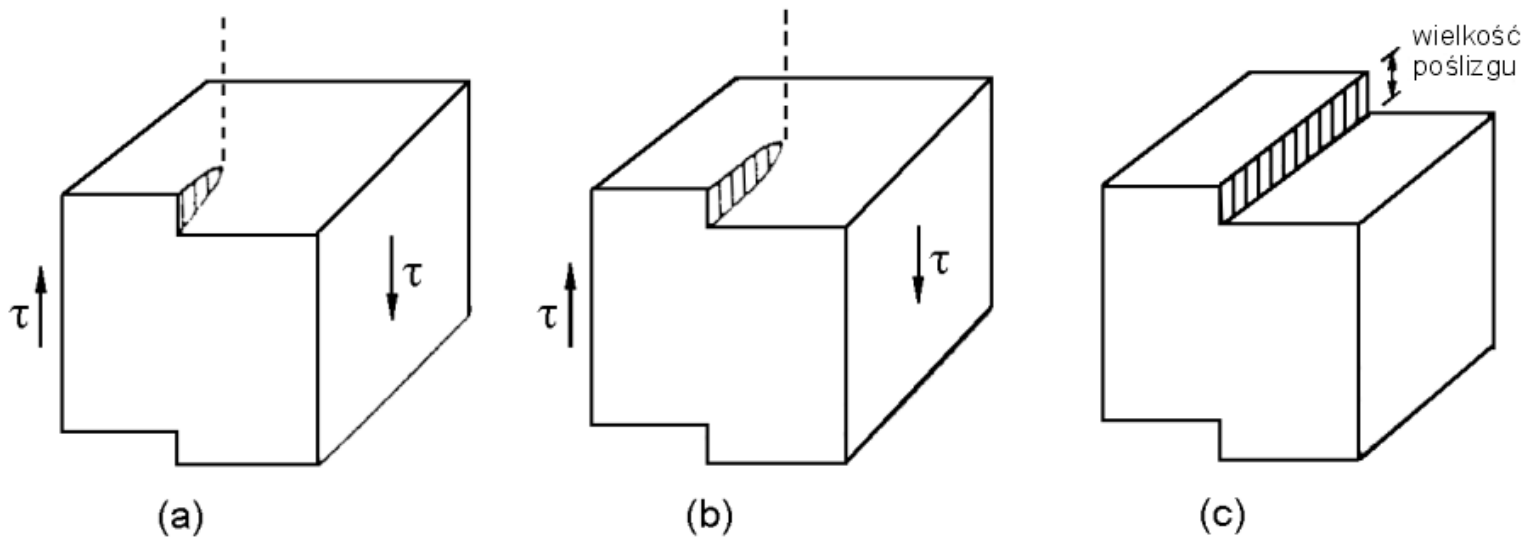


<http://pocketdentistry.com/17-wrought-metals/>

Rys. 1.3. Schemat poślizgu spowodowanego przez ruch dyslokacji krawędziowej.

1.2.2. Inicjacja pęknięć zmęczeniowych

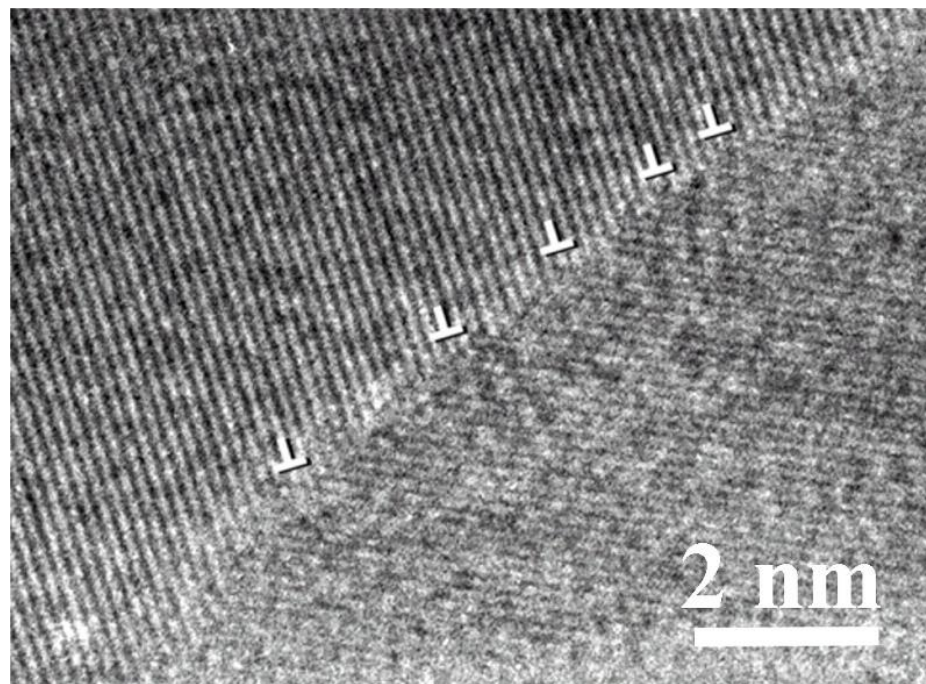
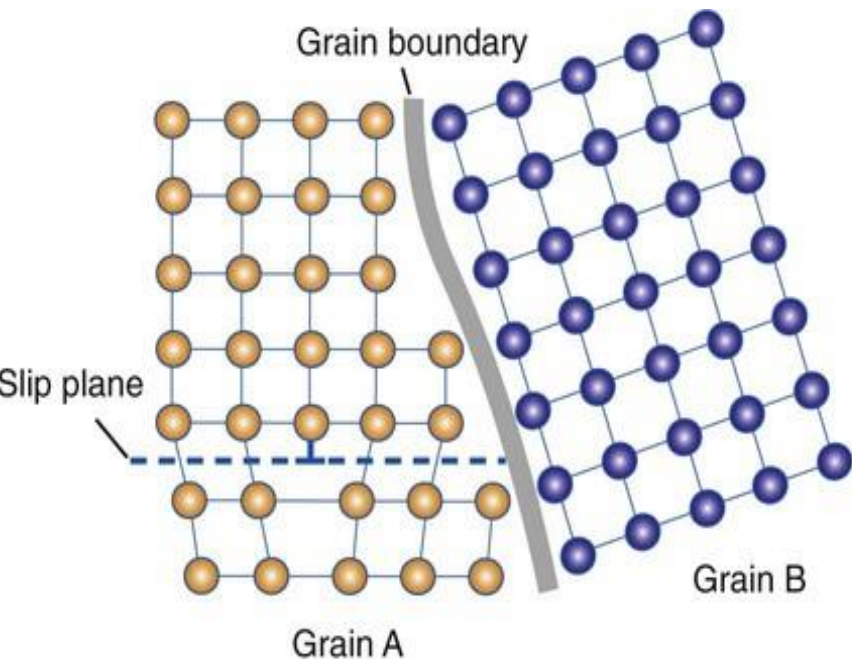
- Pasma poślizgu – regiony szczególnej koncentracji dyslokacji. Pasma poślizgu są przedzielone obszarami mniejszej deformacji plastycznej.



Rys. 1.4. Schemat poślizgu spowodowanego przez ruch dyslokacji śrubowej.

1.2.2. Inicjacja pęknięć zmęczeniowych

□ Pasma poślizgu – granice ziaren blokują ruch dyslokacji:



<http://pocketdentistry.com/17-wrought-metals/>

© Mike Meier, University of California
<http://www.pearson-studium.de/books/3827370597/cd01/Gallery.htm>

Rys. 1.5. Blokowanie dyslokacji na granicach ziaren.

1.2.2. Inicjacja pęknięć zmęczeniowych

□ **Pasma poślizgu – regiony szczególnej koncentracji dyslokacji. Pasma poślizgu są przedzielone obszarami mniejszej deformacji plastycznej.**

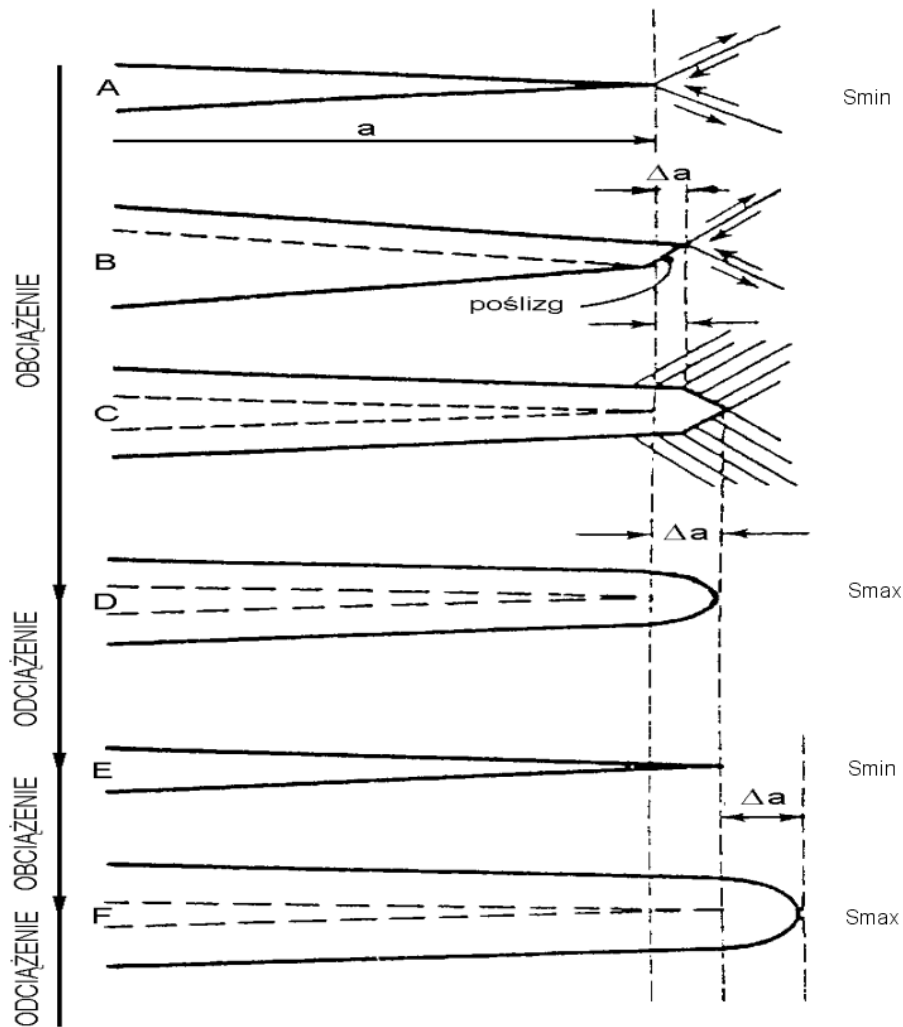
a) Metale o dużej ciągliwości (niska granica plastyczności, wydłużenie procentowe w próbie rozciągania > 5%)

- Liczba pasm poślizgu rośnie wraz z liczbą cykli obciążenia aż do poziomu nasycenia. Od tego stadium rozwój deformacji plastycznych następuje tylko w niektórych pasmach poślizgu.
- Niektóre z pasm poślizgu przekształcają się w mikropęknięcia wewnątrz ziaren.
- Wzrost (w płaszczyznach τ_{\max}) i łączenie się mikropęknięć aż utworzą się duże, makroskopowo widoczne pęknięcia (długość rzędu 10^{-1} mm).
- Wzrost makropęknięcia (w płaszczyźnie prostopadłej do obciążenia rozciągającego), aż do zniszczenia.

1.2.2. Inicjacja pęknięć zmęczeniowych

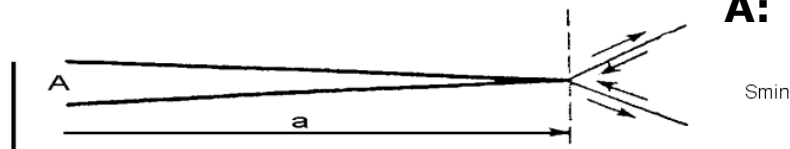
- **Pasma poślizgu – regiony szczególnej koncentracji dyslokacji. Pasma poślizgu są przedzielone obszarami mniejszej deformacji plastycznej.**
 - a) Metale o dużej ciągliwości (niska granica plastyczności, wydłużenie procentowe w próbie rozciągania > 5%)**
 - b) Metale o niskiej ciągliwości (wysoka wytrzymałość)**
 - Pasma poślizgu nieliczne.
 - Inicjacja mikropęknięć w miejscach defektów (rys 1.1 i 1.2).
 - Mikropęknięcia mniej liczne, niż w metalach ciągliwych.
 - Wzrost mikropęknięć w płaszczyznach prostopadłych do obciążenia rozciągającego (inaczej niż w metalach typu a)) i ich łączenie się w makropęknięcia.

1.3. WZROST MAKROPEKNIĘCIA ZMĘCZENIOWEGO



Rys.1.6 *Możliwy mechanizm wzrostu pęknięcia zmęczeniowego.*

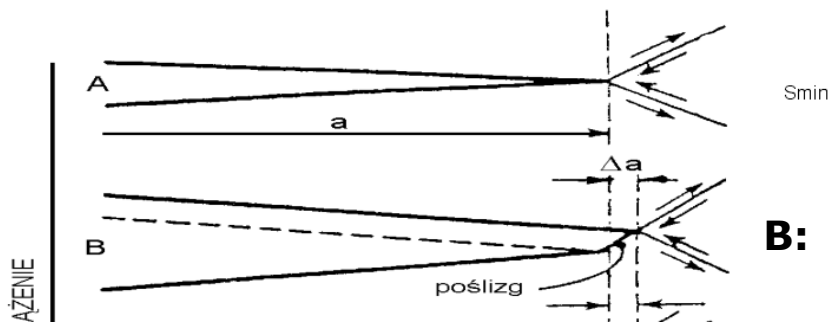
1.3. WZROST MAKROPEKNIĘCIA ZMĘCZENIOWEGO



A: Na skutek koncentracji naprężeń w wierzchołku pęknięcia (ostry karb przy odciążeniu). Powstają tam zawsze odkształcenia plastyczne. Konsekwencja: pasma poślizgu w kierunku płaszczyzn τ_{\max} .

Rys.1.6 *Możliwy mechanizm wzrostu pęknięcia zmęczeniowego.*

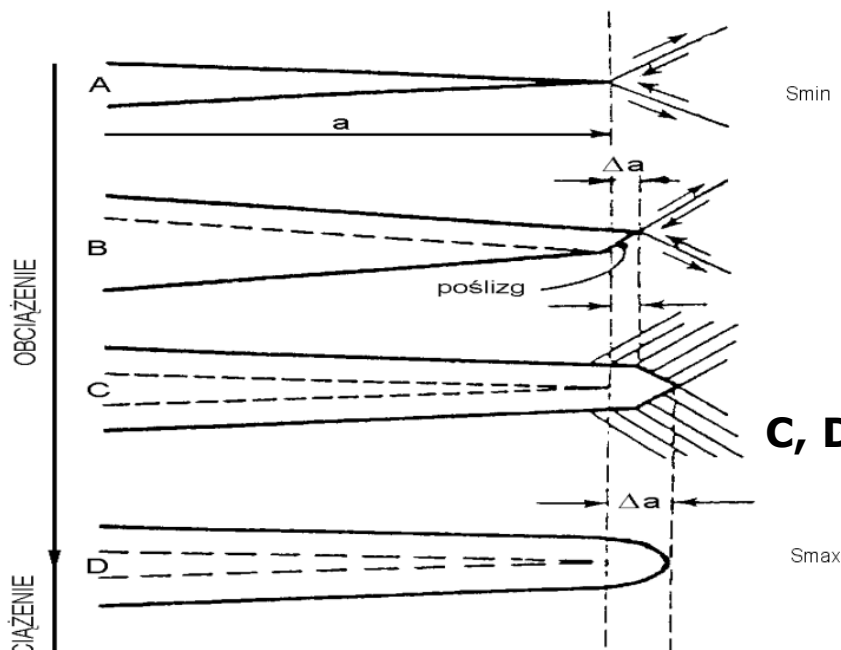
1.3. WZROST MAKROPEKNIĘCIA ZMĘCZENIOWEGO



B: przyrost pęknięcia Δa na skutek pierwszego pasma poślizgu

Rys.1.6 *Możliwy mechanizm wzrostu pęknięcia zmęczeniowego.*

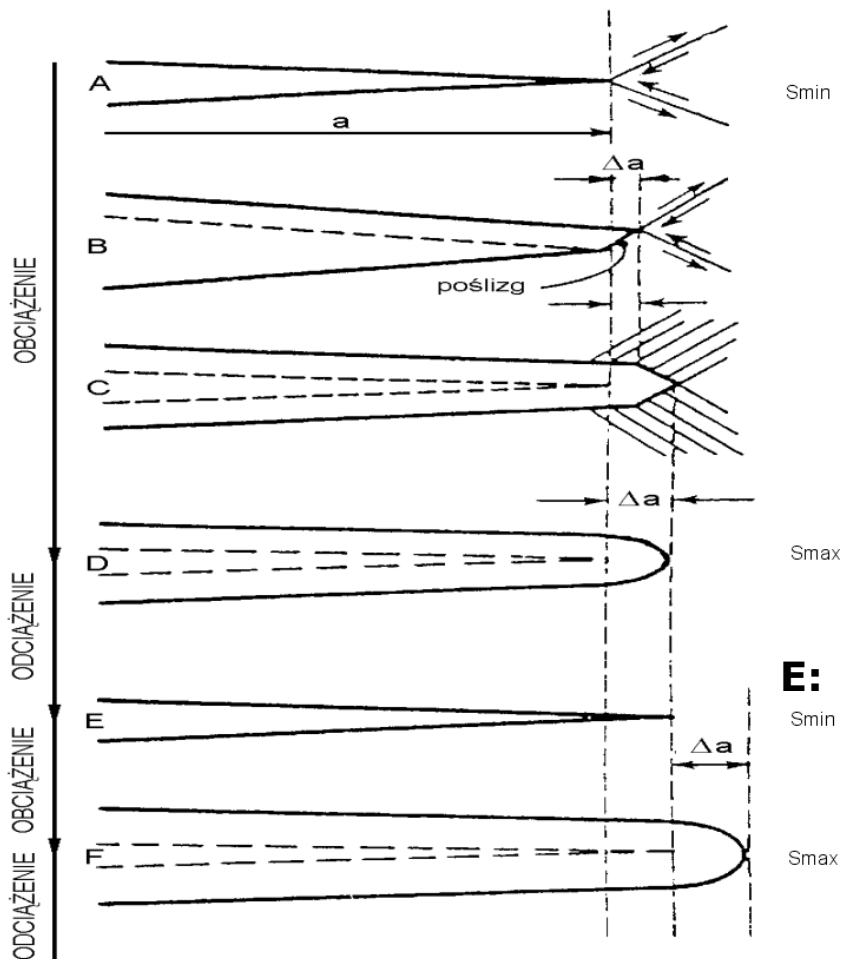
1.3. WZROST MAKROPEKNIĘCIA ZMĘCZENIOWEGO



C, D: powstanie nowych pasm poślizgu powoduje dalszy przyrost pęknięcia i zaokrąglenie jego wierzchołka

Rys.1.6 *Możliwy mechanizm wzrostu pęknięcia zmęczeniowego.*

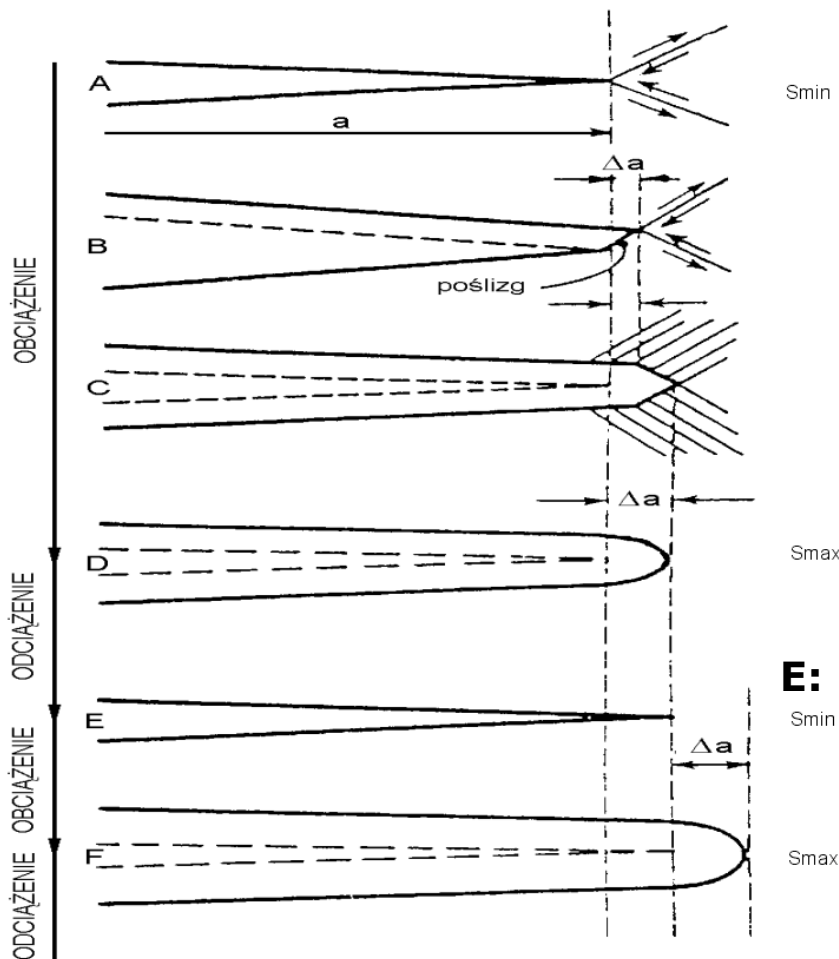
1.3. WZROST MAKROPEKNIĘCIA ZMĘCZENIOWEGO



E: po odciążeniu ponownie ostry karb w wierzchołku pęknięcia , co powoduje przyrost pęknięcia w kolejnym cyklu obciążenia

Rys.1.6 *Możliwy mechanizm wzrostu pęknięcia zmęczeniowego.*

1.3. WZROST MAKROPEKNIĘCIA ZMĘCZENIOWEGO



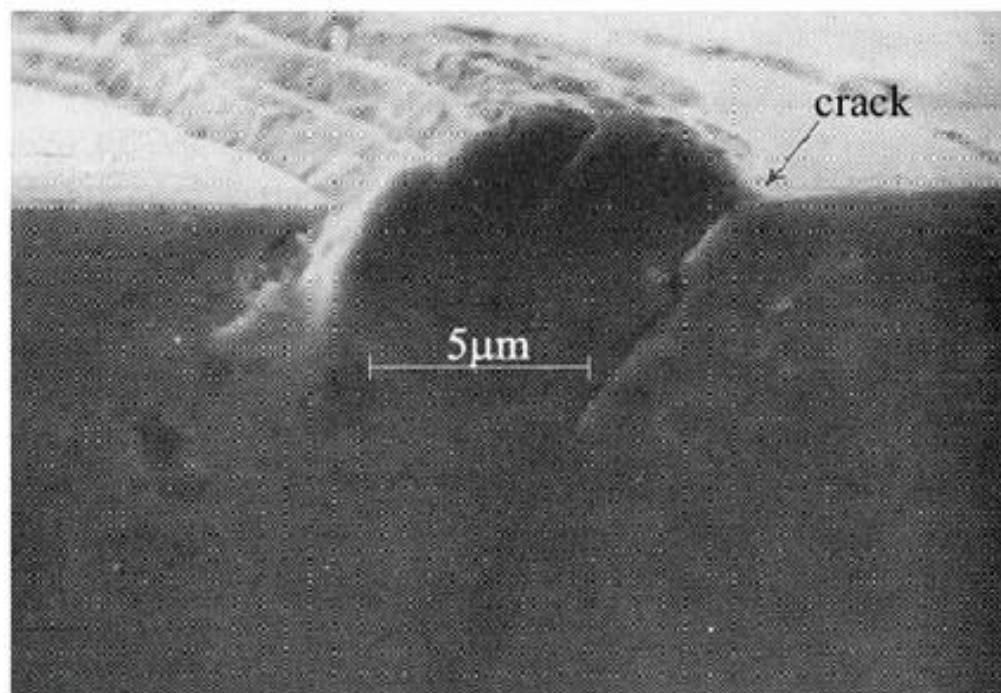
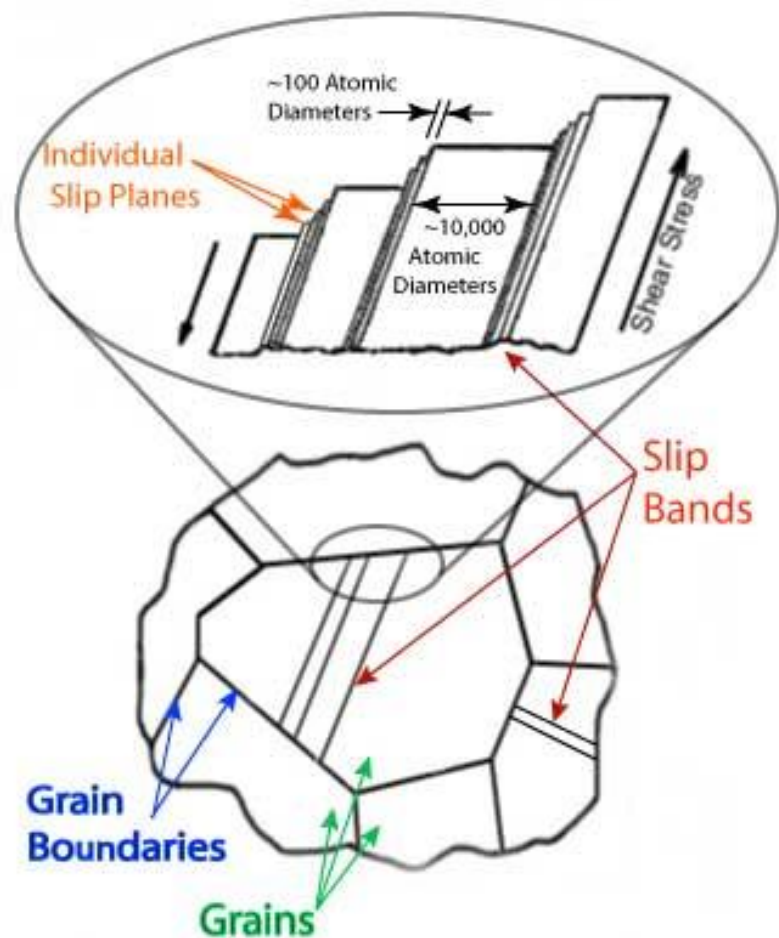
Uwaga:

na skutek utlenienia nowopowstałych powierzchni pęknięcia , proces jest nieodwracalny tzn. przyrost pęknięcia pozostaje po odciążeniu.

E: po odciążeniu ponownie ostry karb w wierzchołku pęknięcia , co powoduje przyrost pęknięcia w kolejnym cyklu obciążenia

Rys.1.6 *Możliwy mechanizm wzrostu pęknięcia zmęczeniowego.*

1.3. WZROST MAKROPEKNIĘCIA ZMĘCZENIOWEGO



(Suresh 1991)

Rys.1.6 Tworzenie mikropęknięcia wokół płaszczyzn poślizgu

<https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Structure/fatigue.htm>

W wielu konstrukcjach (np. spawanych) nie da się uniknąć wad o ostrym kształcie, które mogą spowodować wzrost pęknięć natychmiast po rozpoczęciu pracy.

Tolerancja uszkodzeń - zdolność konstrukcji zawierających wady lub pęknięcia do bezpiecznej pracy, aż do czasu gdy pęknięcia te zostaną wykryte i naprawione lub też uszkodzone elementy zostaną wymienione.

Projektowanie metodą tolerancji uszkodzeń umożliwia:

- dobór materiałów o wysokiej odporności na pękanie
- zapewnienie, że pęknięcia nie doprowadzą do zniszczenia przed zakończeniem planowanego czasu użytkowania urządzenia
- zaplanowanie reżimu kontroli na obecność pęknięć w czasie eksploatacji.

Matematyczne narzędzie w analizie tolerancji uszkodzeń: **Mechanika pękania**

1.5. METODOLOGIA ZACHOWANIA INTEGRALNOŚCI KONSTRUKCJI PRACUJĄCYCH PRZY OBCIĄŻENIACH ZMĘCZENIOWYCH

Nazwa	Główne * Zmienne	Uwzględniany wpływ plastyczności	Uwzględniany wpływ wzrostu pęknięcia
Metoda naprężenia nominalnego	S, N	NIE	NIE
Metoda odkształcenia lokalnego	σ, ε, N	TAK	NIE
Mechanika pękania	$K, da/dN$	NIE	TAK

S – naprężenie nominalne

σ – naprężenie lokalne

ε – odkształcenie lokalne

N – liczba cykli obciążenia

K – współczynnik intensywności naprężeń

da/dN – prędkość wzrostu pęknięcia

Uwaga:

Wszystkie analizy wymagają odpowiedniej bazy danych eksperymentalnych.

Obiekty badań eksperymentalnych:

- **próbki laboratoryjne** (często geometria próbek i przebieg badania określone normą),
- **elementy konstrukcyjne** (ang. *components*),
- **cała konstrukcja lub jej duży podzespół** (ang. *full scale test*).

Obciążenia:

- **stałoamplitudowe** (pod kontrolą siły lub przemieszczenia),
- **zmięnoamplitudowe programowane** (wiązki cykli obciążenia o stałej amplitudzie i współczynniku asymetrii cyklu),
- **zmięnoamplitudowe realistycznie symulujące obciążenia eksploatacyjne.**