

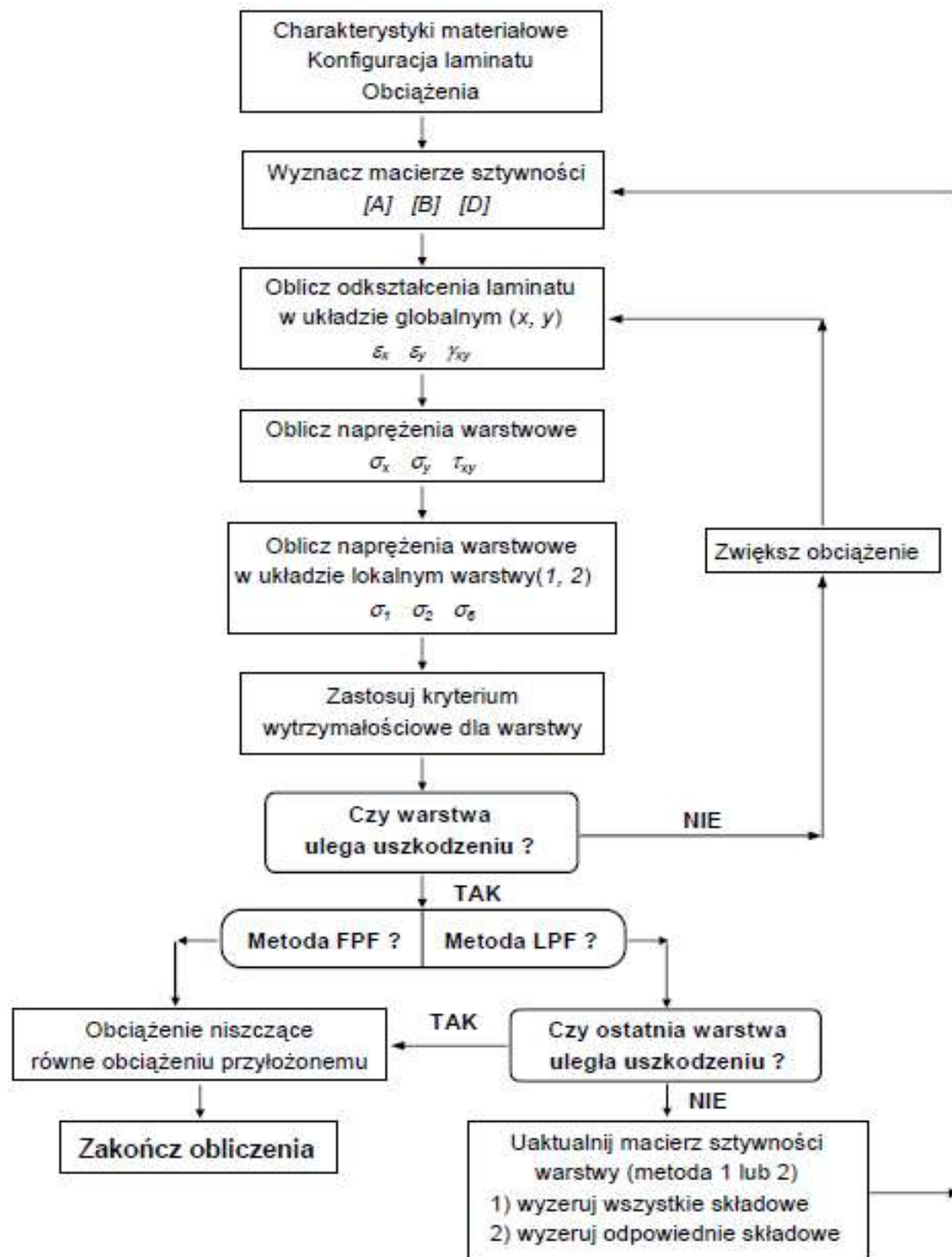
**Wytrzymałość
i mechanizmy
zniszczenia laminatów**

Wytrzymałość laminatu

Do pojedynczej warstwy kompozytu stosujemy kryteria wytrzymałościowe:

- Maksymalnych odkształceń
- Maksymalnych naprężeń
- Tsai-Hilla
- Tsai-Wu

W przypadku laminatów również możemy zastosować te kryteria do każdej z warstw laminatu. Dzięki temu można obliczyć obciążenie, przy którym zniszczeniu ulegnie pierwsza warstwa First Ply Failure (FPF) load lub ostatnia warstwa Last Ply Failure (LPF) load.



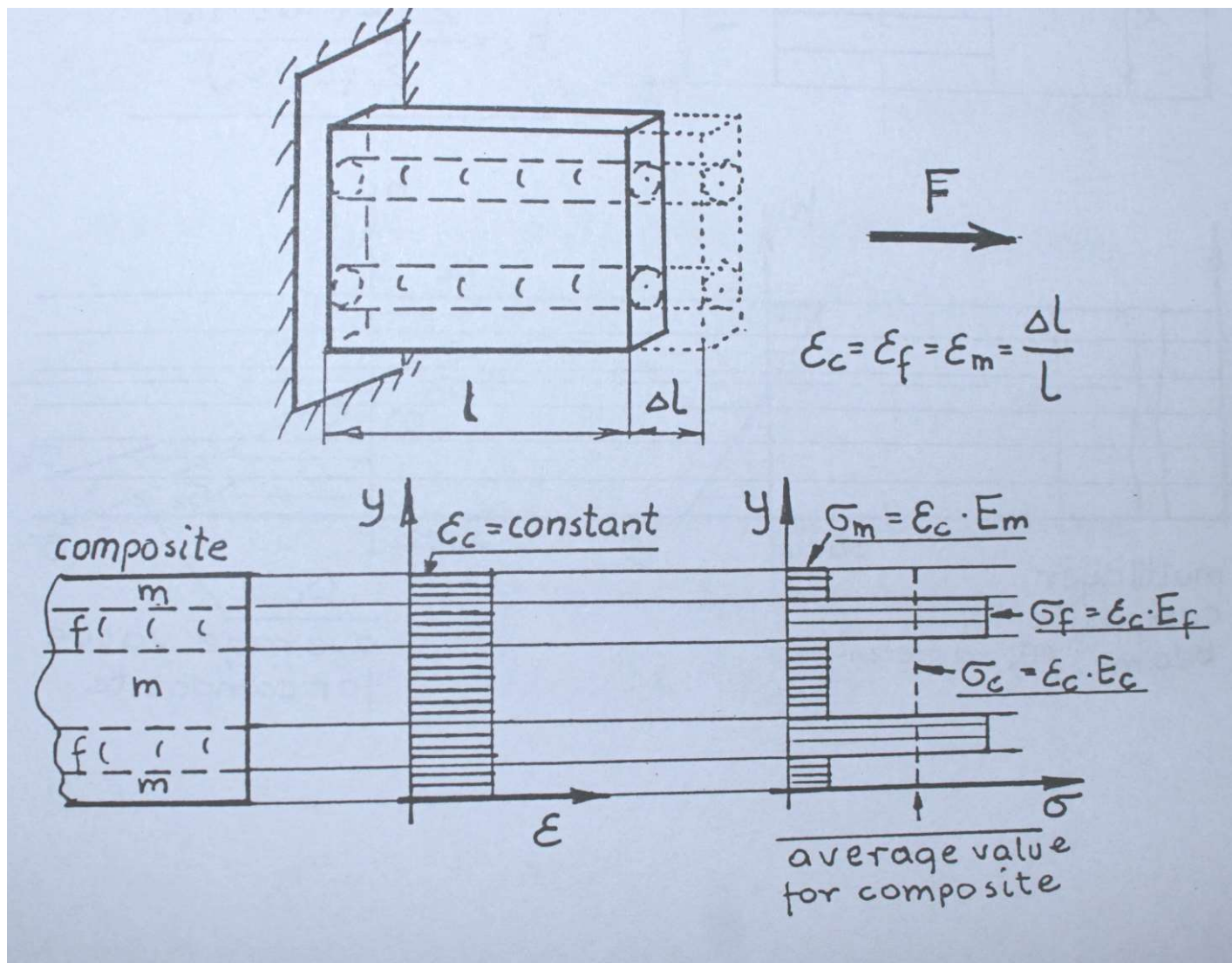
Model mikromechaniczny wytrzymałości warstwy kompozytu

W analizie wytrzymałościowej modelu zakłada się, że:

- zarówno włókna, jak i spoiwo są liniowo sprężyste aż do zniszczenia
- wszystkie włókna mają jednakową wytrzymałość (nie uwzględnia się losowej zmienności wytrzymałości),
- odkształcenia podłużne spoiwa i włókien pod wpływem przyłożonego obciążenia są takie same,
- mimo pęknięcia włókien lub spoiwa, w warstwie rozciąganej nadal panuje jednoosiowy stan naprężenia (pomija się wieloosiowy stan naprężenia, który powstaje w pobliżu miejsca pęknięcia).

Mimo tych założeń upraszczających, model mikromechaniczny jest ogólnie akceptowany, gdyż daje on dobry obraz wytrzymałości kompozytu w zależności od wytrzymałości i udziału objętościowego włókien i spoiwa.

Zniszczenie przez rozciąganie

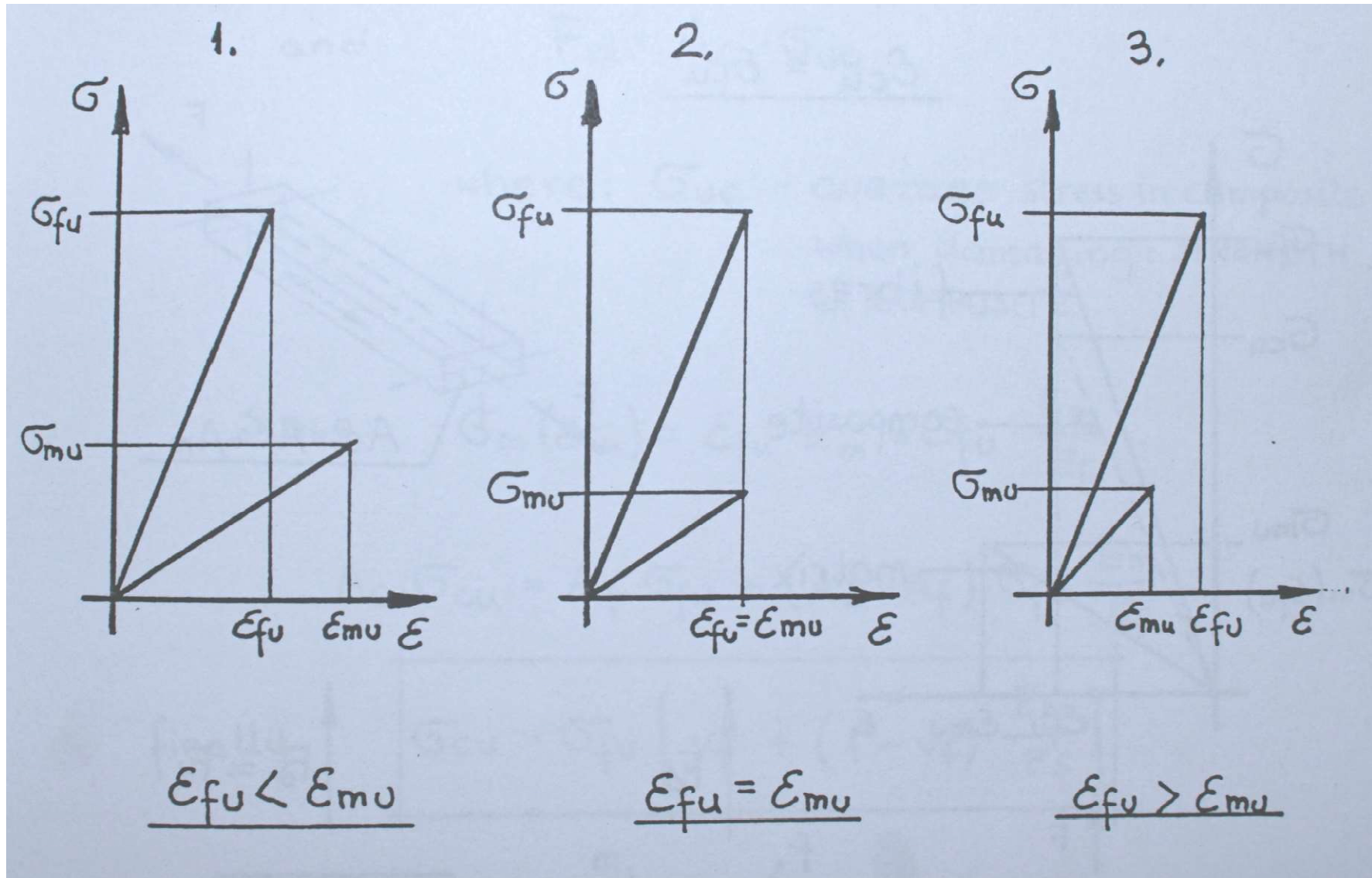


Pod wpływem przyłożonej siły F kompozyt odkształca się w sposób jednorodny, tzn. takie same odkształcenia ϵ_c występują w spoiwie i we włóknach. W spoiwie i włóknach powstają naprężenia, wynoszące:

$$\sigma_f = E_f \epsilon_c, \quad \sigma_m = E_m \epsilon_c$$

Zniszczenie przez rozciąganie

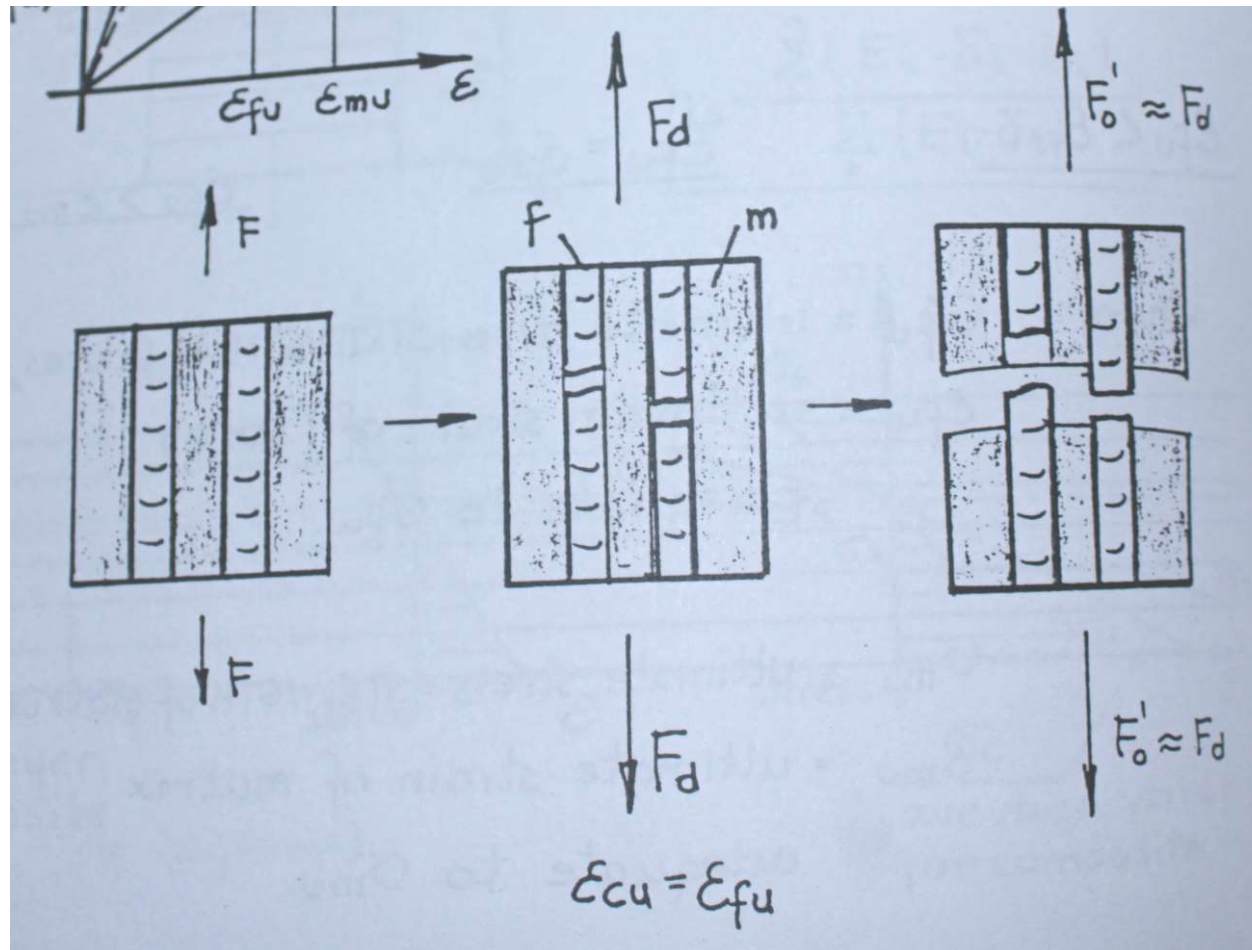
Można rozpatrzeć 3 przypadki:



Zniszczenie przez rozciąganie gdy $\epsilon_{fu} < \epsilon_{mu}$

Zniszczenie kompozytu następuje, gdy odkształcenie kompozytu jest równe maksymalnemu odkształceniu włókien: $\epsilon_{cu} = \epsilon_{fu}$

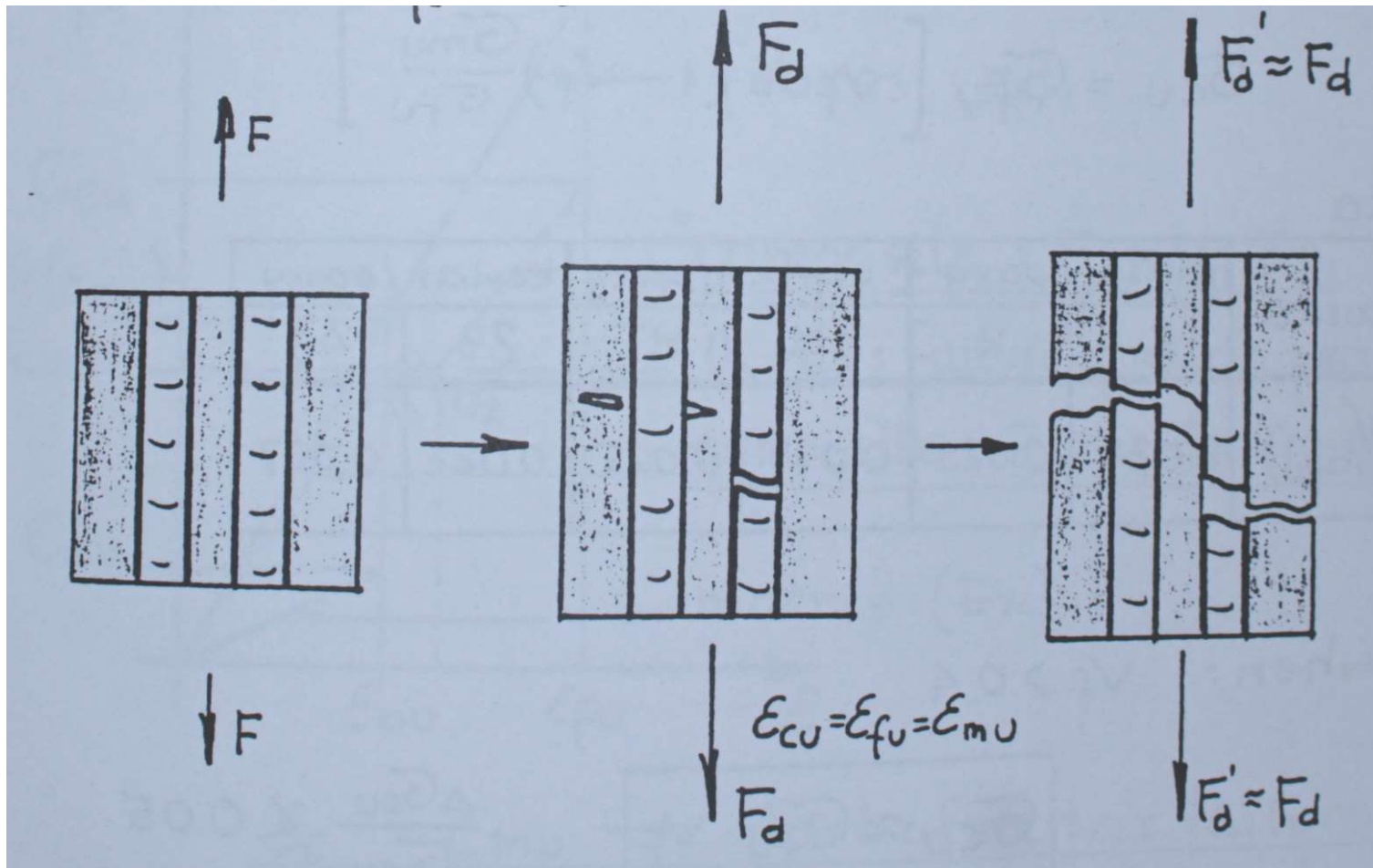
$$F_d = A_f \sigma_{fu} + A_m \sigma_m(\epsilon_{fu})$$



Zniszczenie przez rozciąganie gdy $\epsilon_{fu} = \epsilon_{mu}$

Zniszczenie kompozytu występuje jednocześnie we włóknach i w spoiwie: $\epsilon_{cu} = \epsilon_{fu} = \epsilon_{mu}$

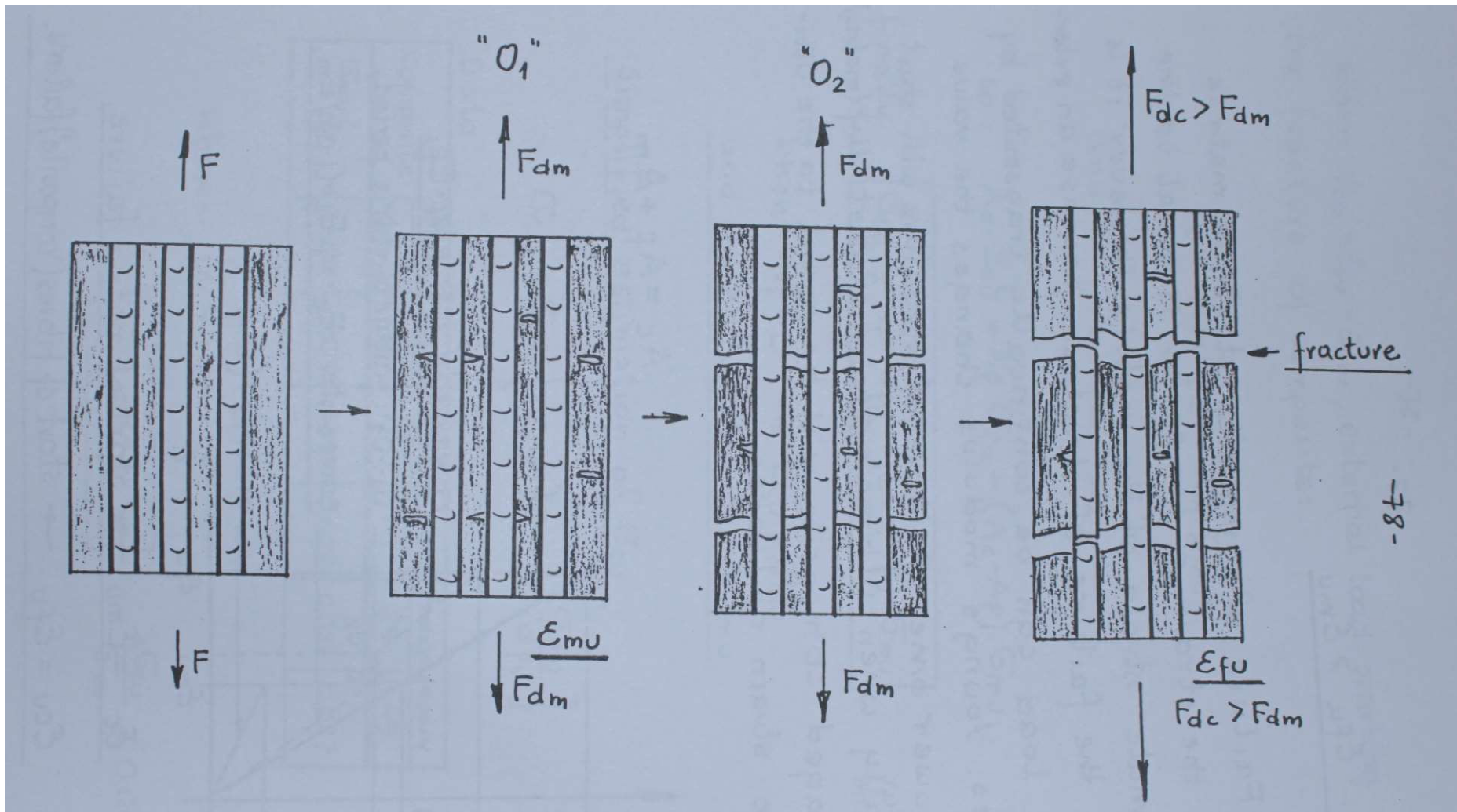
$$F_d = A_f \sigma_{fu} + A_m \sigma_{mu}$$



Zniszczenie przez rozciąganie gdy $\epsilon_{fu} > \epsilon_{mu}$

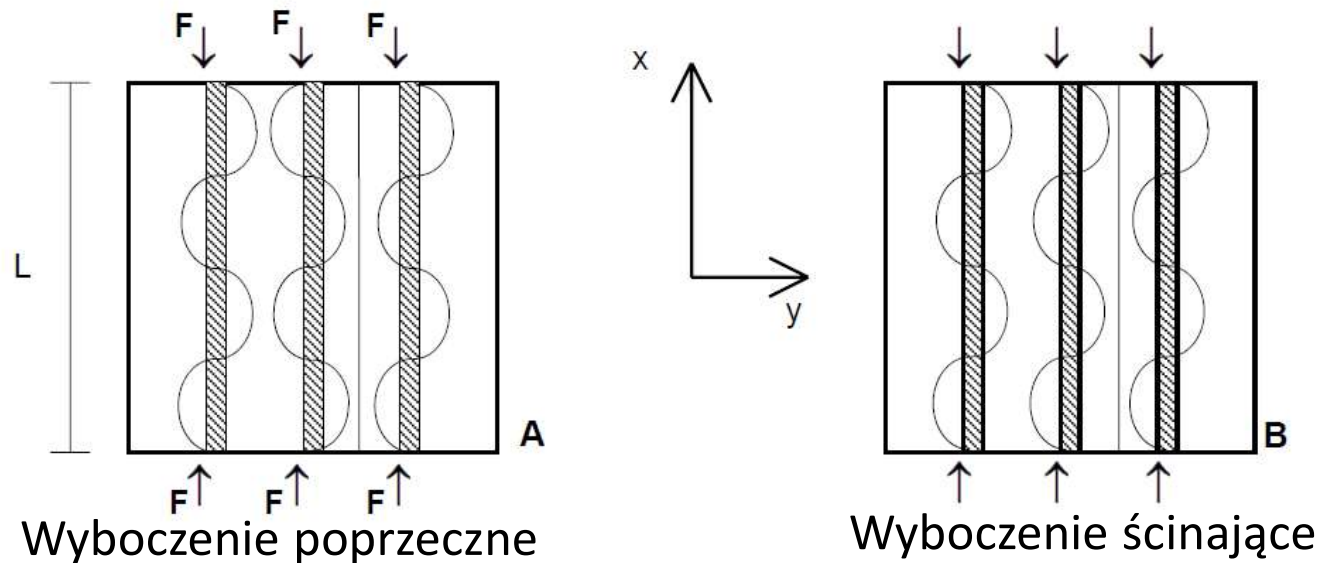
Zniszczenie kompozytu zaczyna się w spoiwie, kiedy odkształcenie kompozytu osiąga wartość odkształceń maksymalnych dla spoiwa. Nie powoduje to jednak całkowitego zniszczenia kompozytu, które następuje dopiero, gdy zostanie osiągnięte maksymalne odkształcenie dla włókien.

$$F_{dm} = A_f \sigma_f(\epsilon_{mu}) + A_m \sigma_{mu}$$



Zniszczenie przez ściskanie

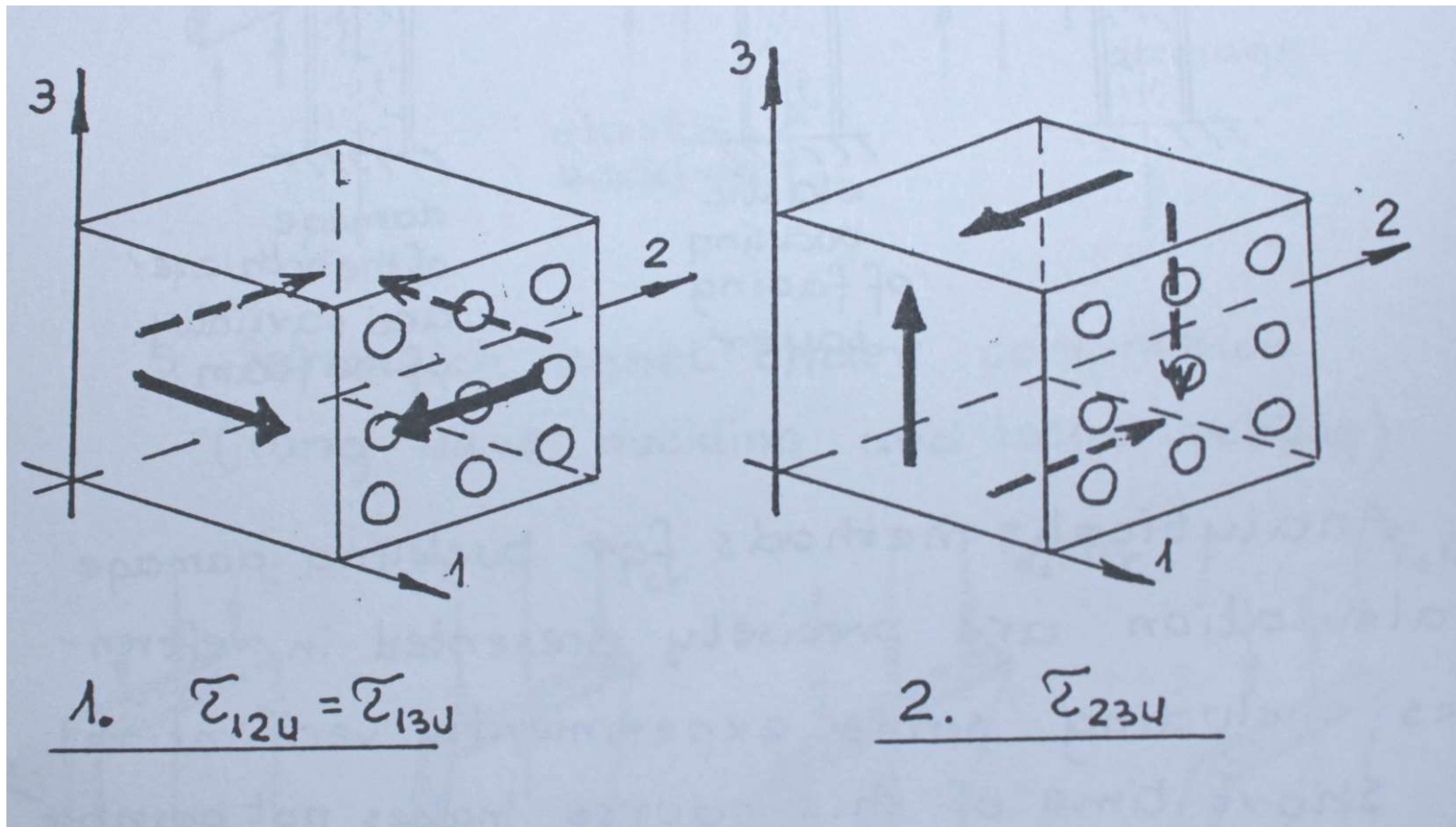
Przy obciążeniu ściskającym, działającym wzdłuż kierunku włókien, zniszczenie kompozytu jest związane z efektem wyboczenia włókien w płaszczyźnie warstwy kompozytowej. Rola spoiwa jest w tym przypadku znacznie większa niż przy obciążeniu rozciągającym, gdyż stanowi ona rodzaj podpory dla włókien, utrudniającej ich wyboczenie. Wytrzymałość warstwy kompozytu włóknistego na ściskanie zdeterminowana jest wyboczeniem włókien, które może być typu poprzecznego lub ścinającego:



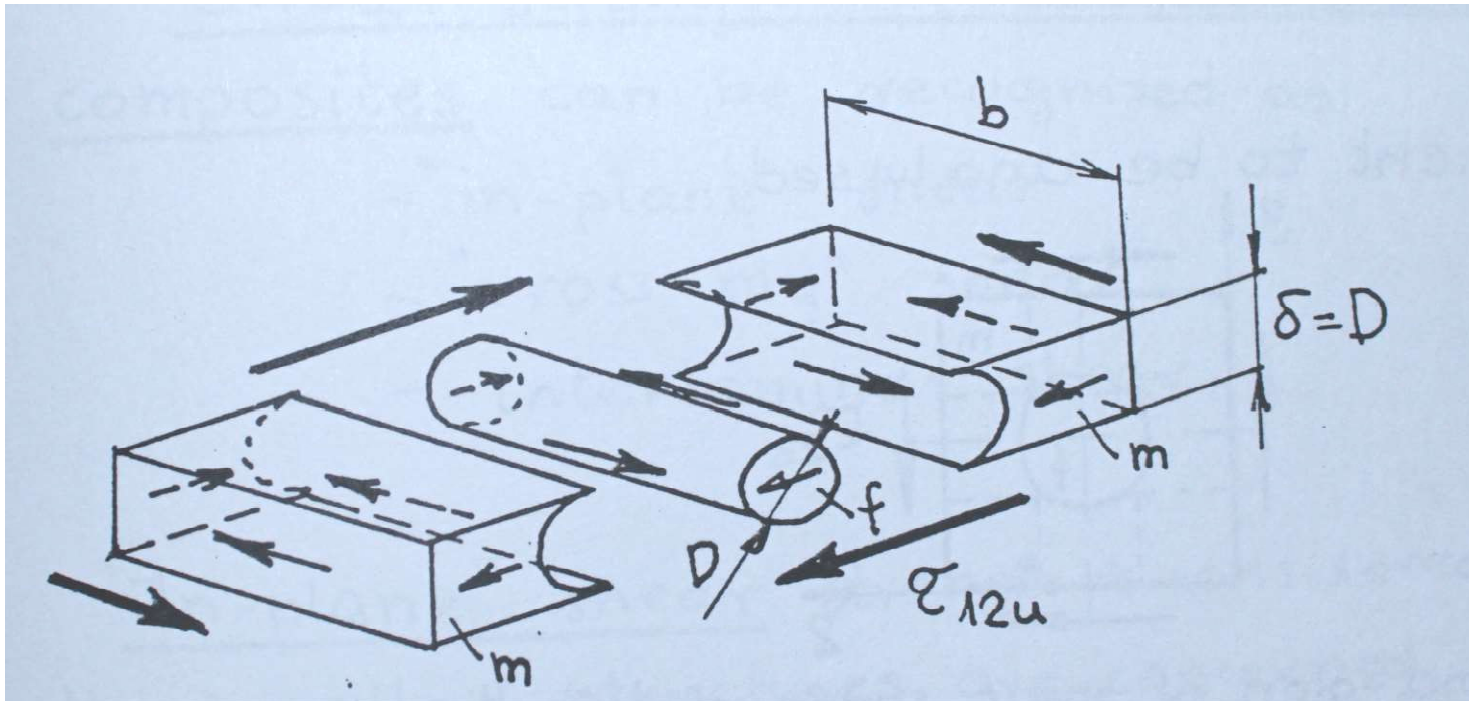
- Wytrzymałość na ściskanie przy wyboczeniu poprzecznym (w stanie wyboczonym włókna są symetryczne względem linii środkowej przebiegającej między nimi), zdeterminowana jest głównie ugięciem włókien,
- Wytrzymałość na ściskanie przy wyboczeniu ścinającym (w stanie wyboczonym włókna są antysymetryczne względem linii środkowej), związana jest przede wszystkim ze ścinaniem spoiwa.

Zniszczenie przez ścinanie

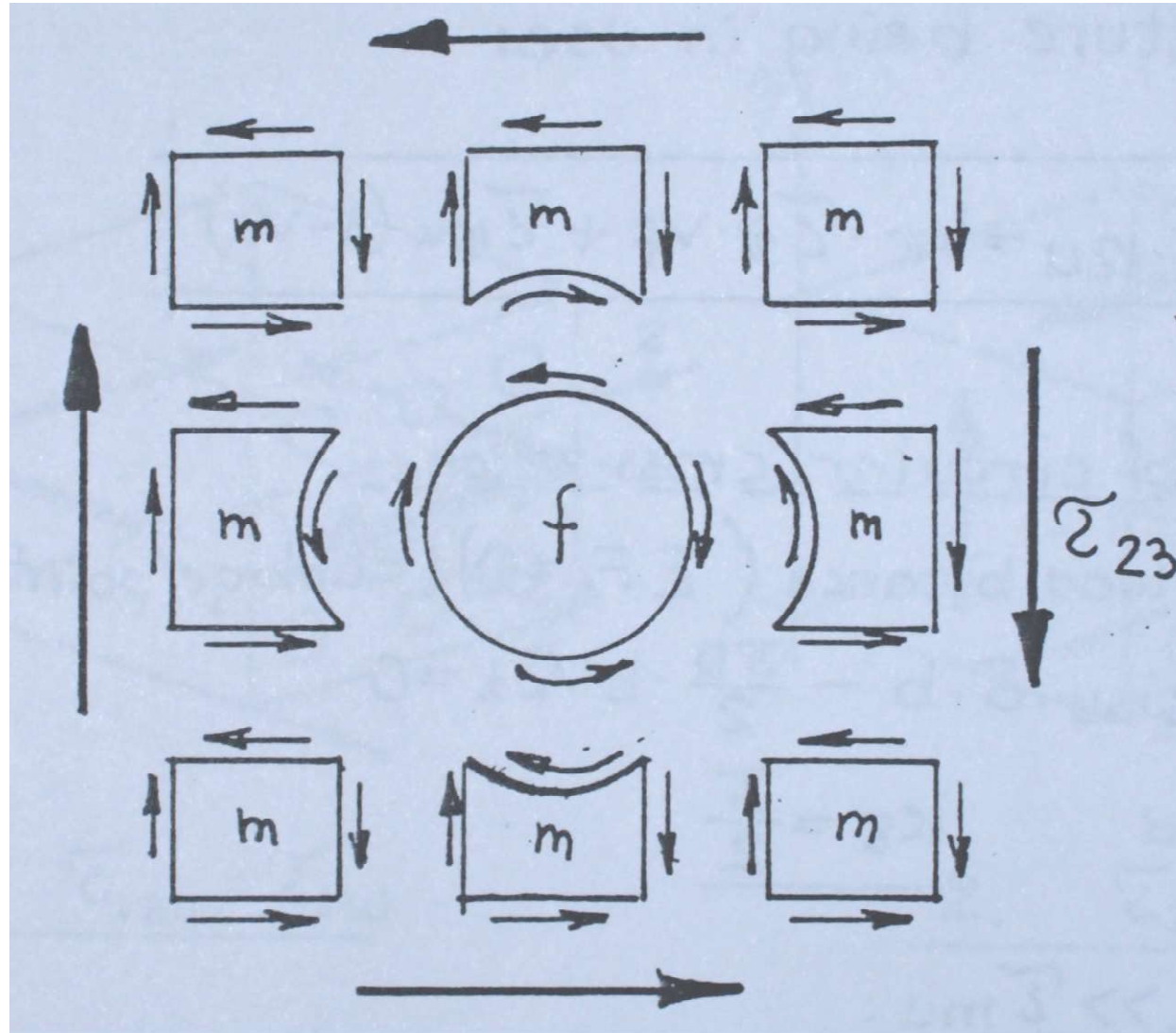
Wytrzymałość na ścinanie zależy głównie od wytrzymałości na ścinanie spoiwa i wytrzymałości połączenia między spoiwem i włóknem. W zależności od płaszczyzny wyróżniamy dwa mechanizmy zniszczenia na ścinanie.



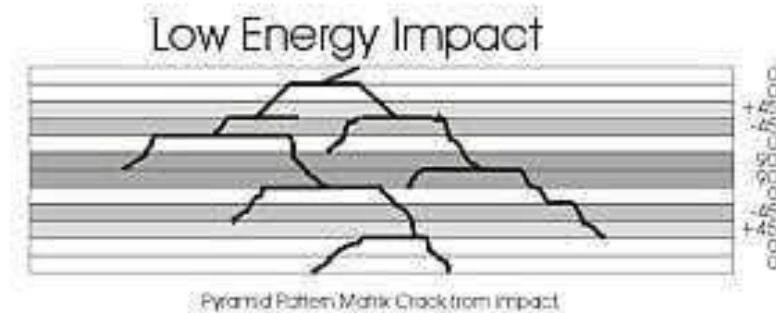
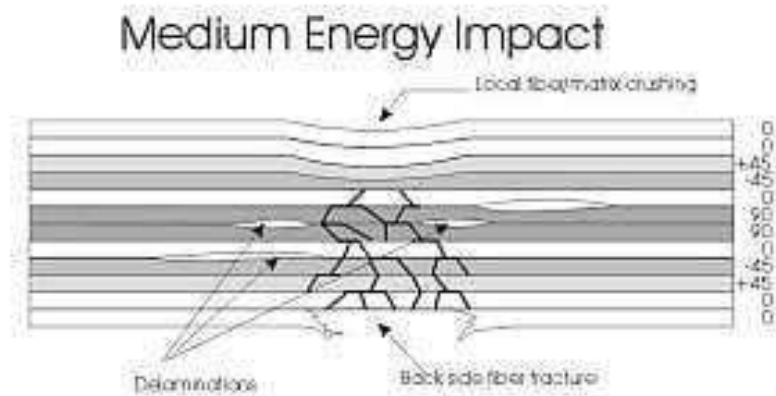
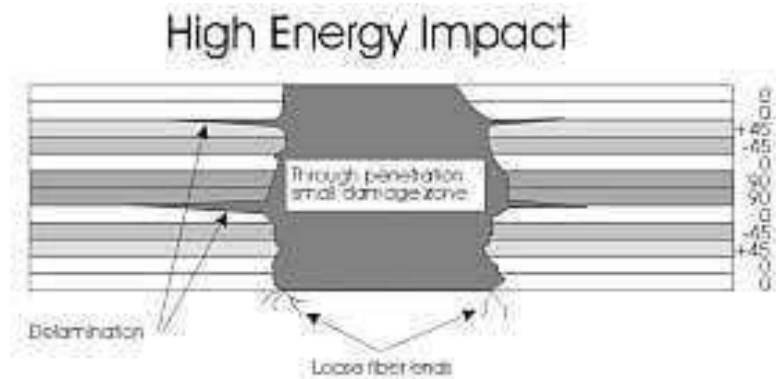
Zniszczenie przez ścinanie w płaszczyźnie 12 i 13



Zniszczenie przez ścinanie w płaszczyźnie 23



Zniszczenia wywołane uderzeniami



Zniszczenia wywołane uderzeniami – uderzenia wysokoenergetyczne

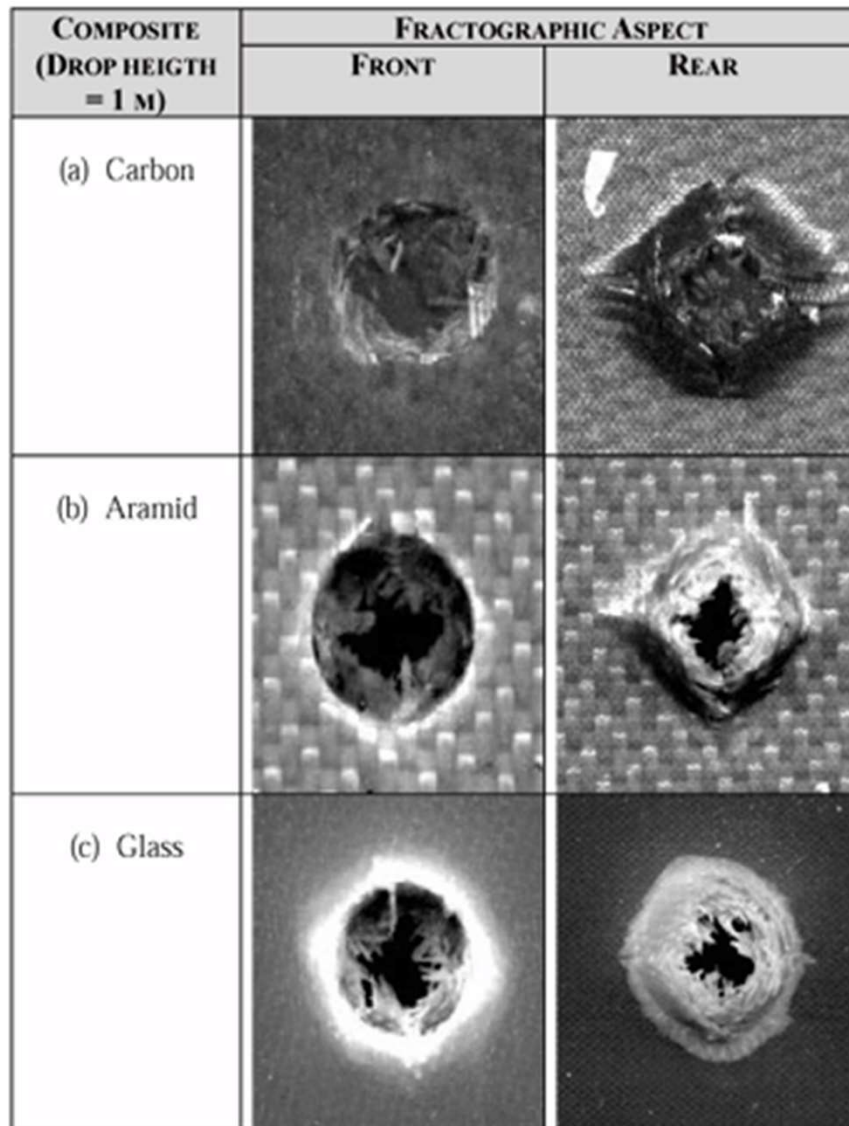


Figure 3. Fractographic aspects of the composites.

Uderzenia wysokoenergetyczne mogą być wywołane np.:

- Trafieniem pociskiem
- Uderzeniami gradu
- Zderzeniami z ptakami
- Uderzeniami kamieni, które wylatują spod kół (runway debris)

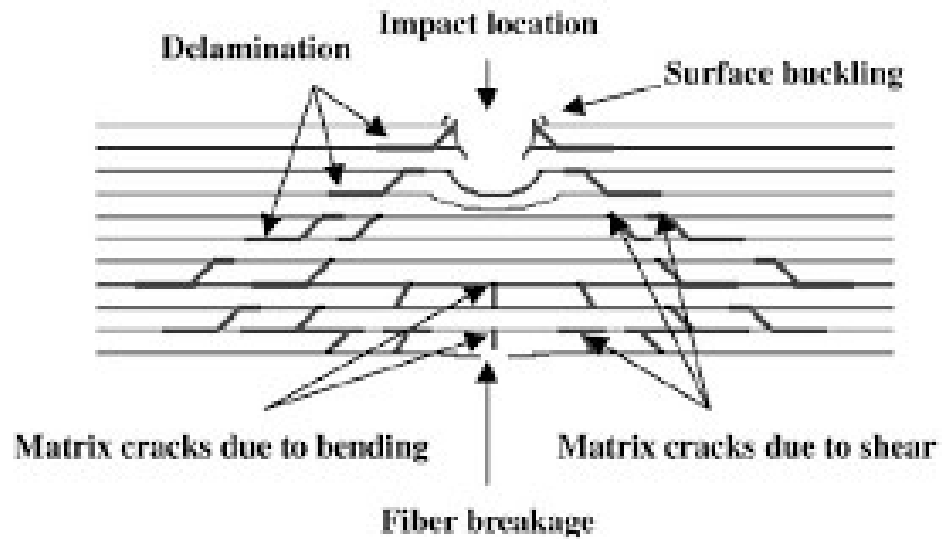
Zniszczenia wywołane uderzeniami – uderzenia niskoenergetyczne

Lp.	Energia uderzenia	Masa młota	Wysokość spadku
1	2,5 J	460 g	55,4 cm
2	5 J	920 g	55,4 cm
3	10 J	1460 g	69,8 cm

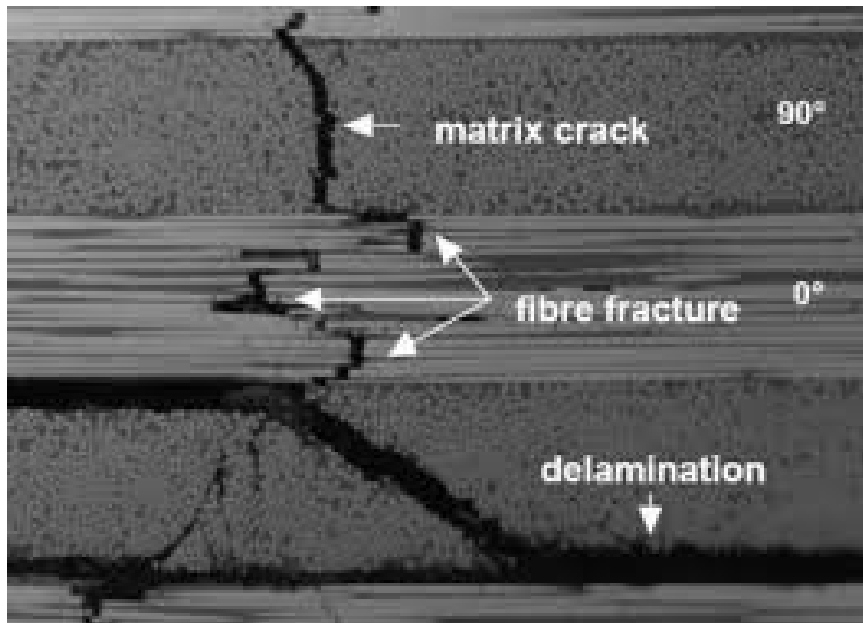
Uderzenia niskoenergetyczne mogą być wywołane np.:

- Uderzeniami gradu
- Przypadkowymi uderzeniami w strukturę w czasie eksploatacji

Zniszczenia wywołane uderzeniami – uderzenia niskoenergetyczne



A. Maier, R. Schmidt, B. Oswald-Tranta, R. Schledjewski



Rahi & Chuwei

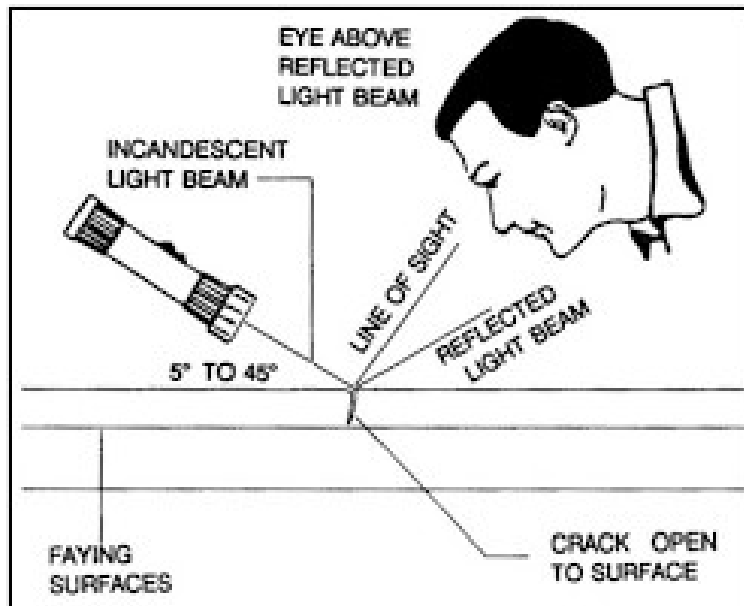


https://www.niar.wichita.edu/niarworkshops/Portals/0/Thursday_1015_Fawcett.pdf

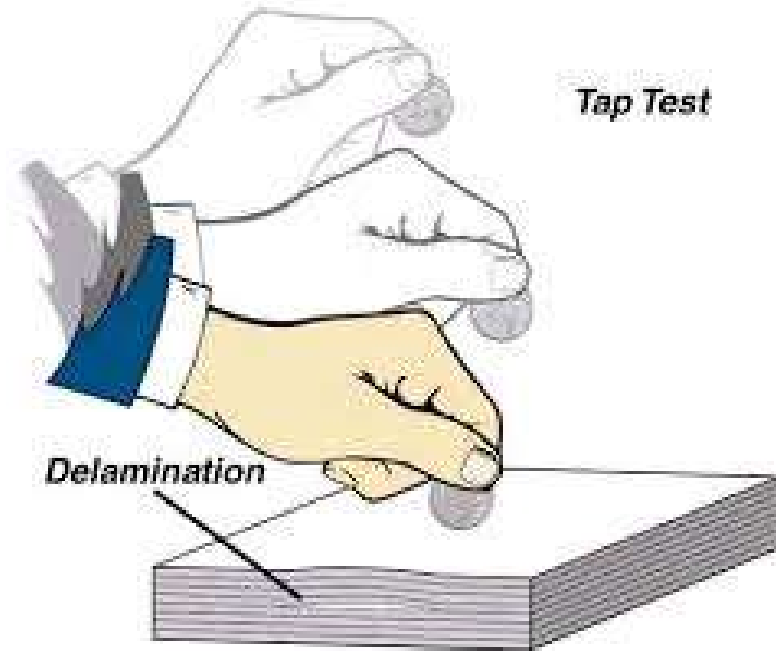
Wykrywanie uszkodzeń

Kontrola wizualna w określonych warunkach

BVID - barely visible impact damage –
prawdopodobieństwo wykrycia uszkodzenia
wynosi 90%

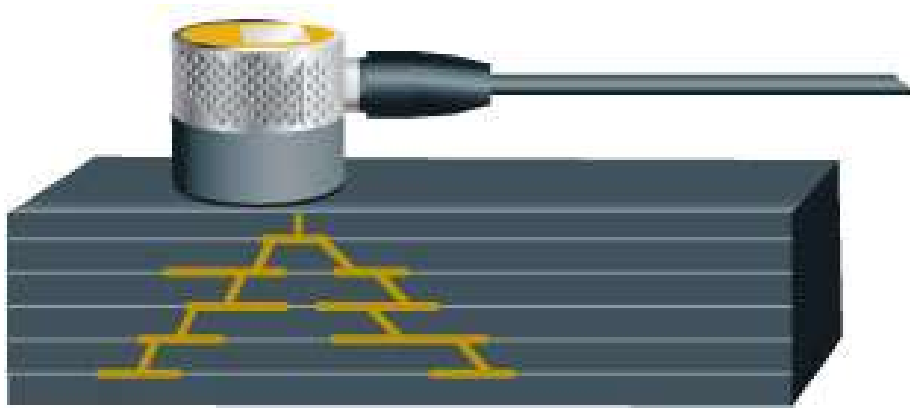


„Opukiwanie”

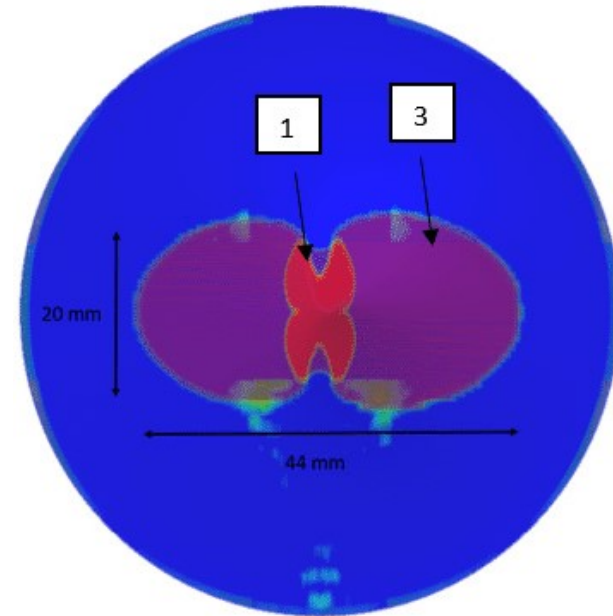


<https://www.eaa.org/en/ea/aircraft-building/building-your-aircraft/while-youre-building/building-articles/composite/repairing-composite-surfaces>

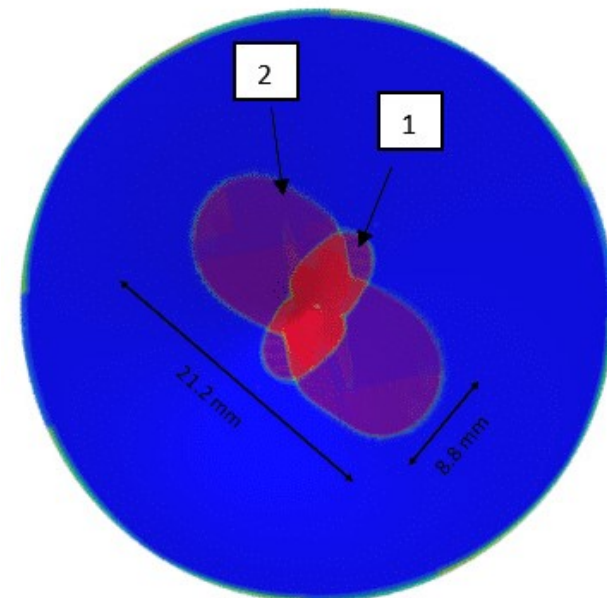
Badania nieniszcząca - ultrasonografia



https://ndt.aero/images/Presentation_26_Nov_2014.pdf

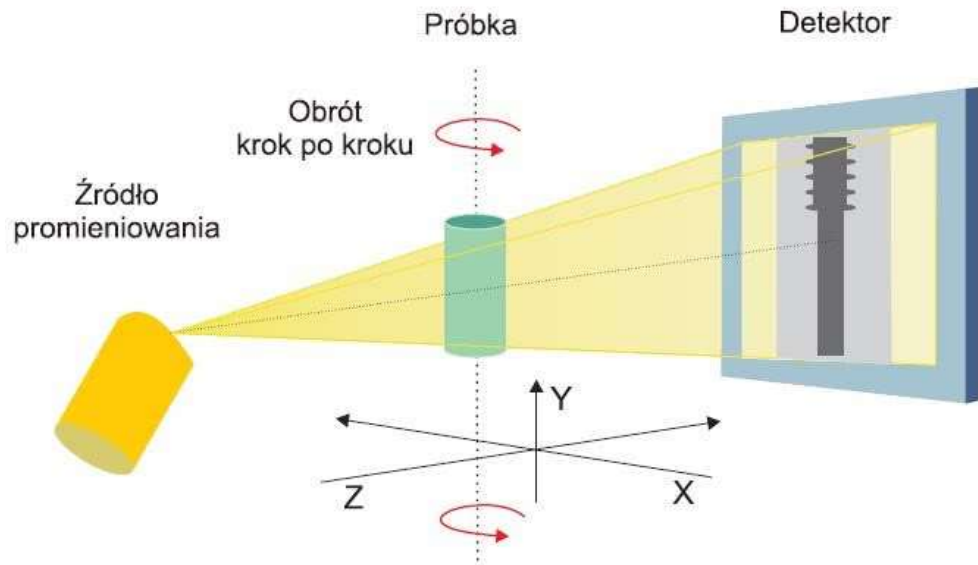


<http://scrnstl.com/>

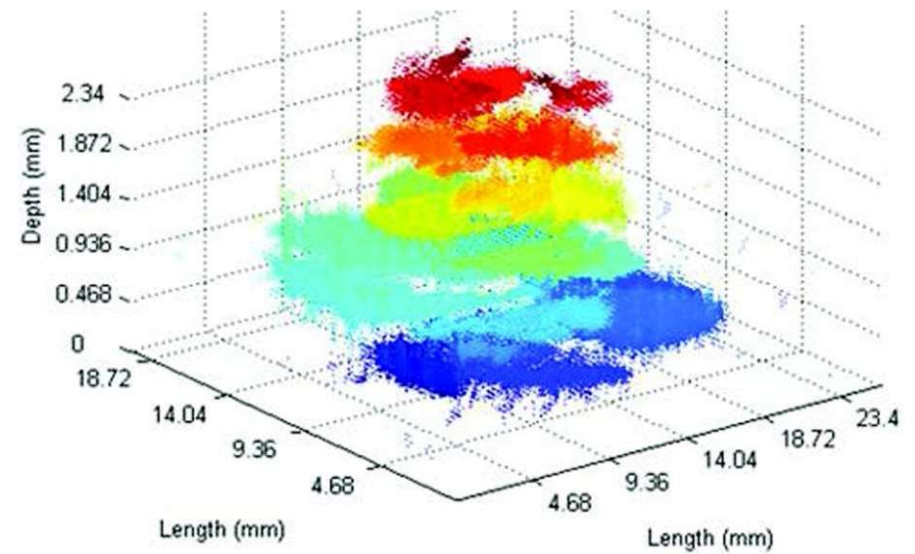


S. H. Khan

Badania nieniszczące – tomografia komputerowa



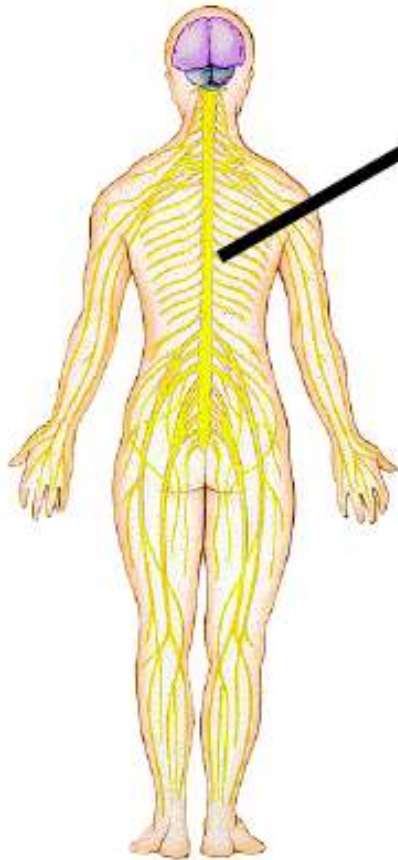
<https://elektronikab2b.pl/prezentacje/5920-tomografia-komputerowa-w-elektronice>



<https://technology.nasa.gov/patent/LAR-TOPS-120>

Wykrywanie uszkodzeń - Health monitoring

Sensor Net-
work



Wykrywanie uszkodzeń - Health monitoring

Technologie najczęściej wykorzystywane w 'health monitoring':

Siatki optyczne Bragga — Światłowody umieszczone w strukturze mają laserowo naniesiony wzór interferencyjny. Każda lokalna zmiana odkształceń powoduje niewielką zmianę długości transmitowanej fali.

Czujniki akustyczne — Czujniki 'nasłuchują' sygnałów dźwiękowych emitowanych przez pęknięcia i delaminacje.

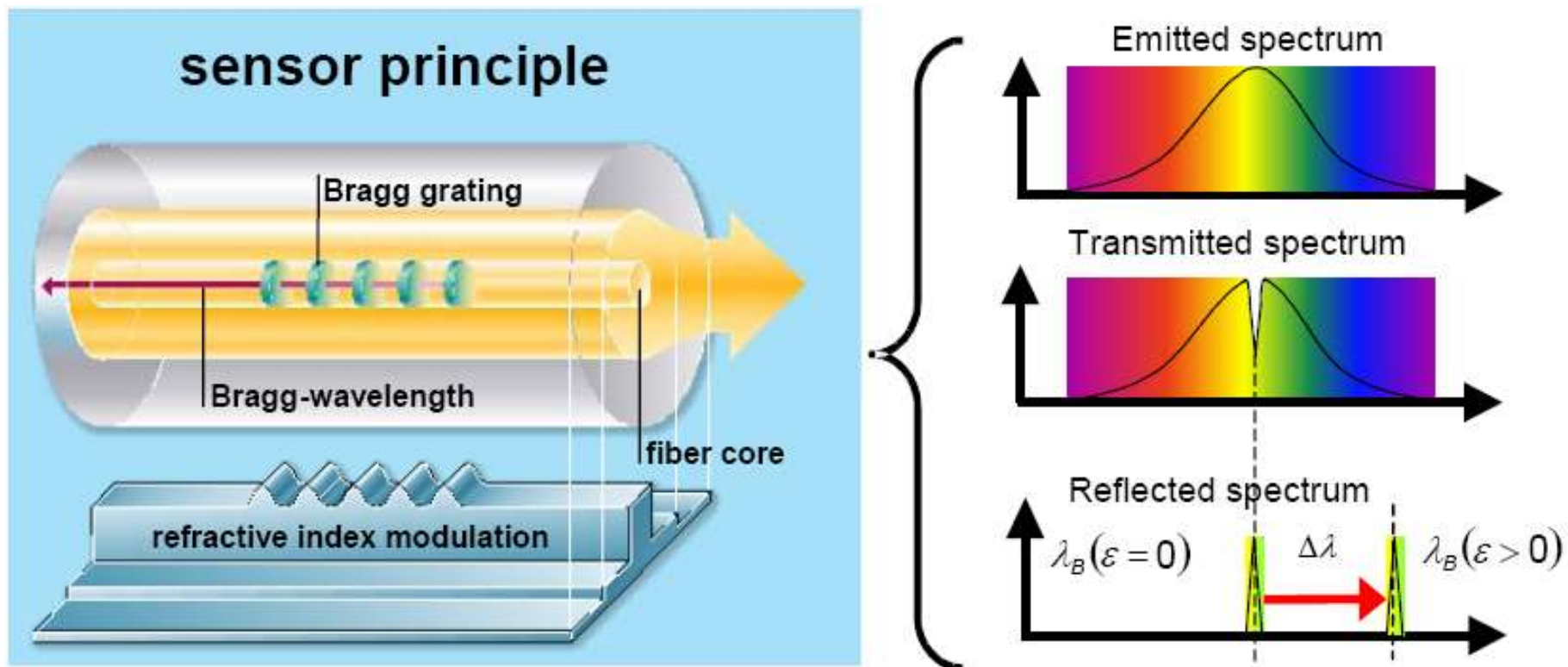
Czujniki akustyczno-ultradźwiękowe — Impulsy akustyczne są wysyłane przez strukturę i odbierane przez czujniki. Uszkodzenia powodują zmianę w odbitej energii akustycznej.

Inteligentne farby — Pokrycia i farby z zatopionymi piezo- i ferroelektrycznymi elementami lub nanorurkami mogą zostać użyte do wykrywania uszkodzeń.

Czujniki mikrofalowe — Małe czujniki mikrofalowe umieszczone w strukturze mogą wysyłać i odbierać impulsy, które wykrywają zawilgocenie struktury. Ta metoda jest dobra do monitorowania struktur przekładkowych.

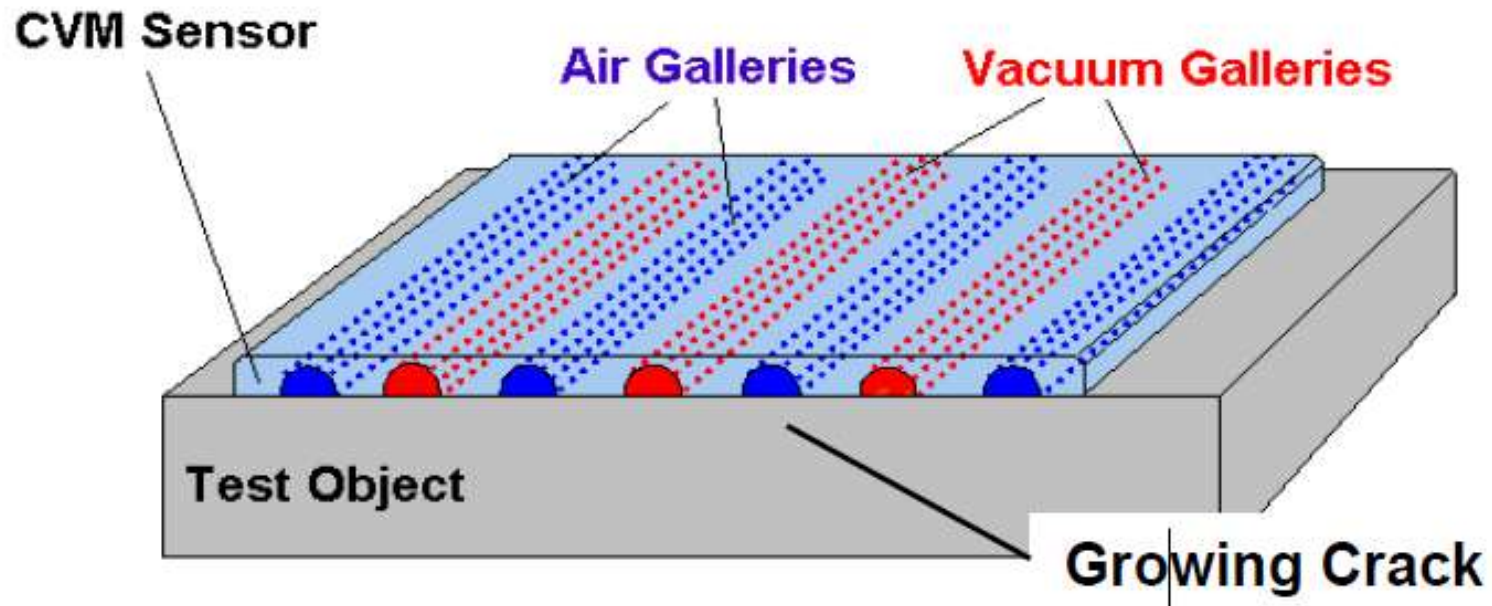
Elementy próżniowe — W strukturze umieszczane są rurki z próżnią w środku podłączone do czujników. Uszkodzenie struktury powoduje uszkodzenie rurki i zniknięcie próżni.

Wykrywanie uszkodzeń - Health monitoring



Siatka Bragga – zasada działania

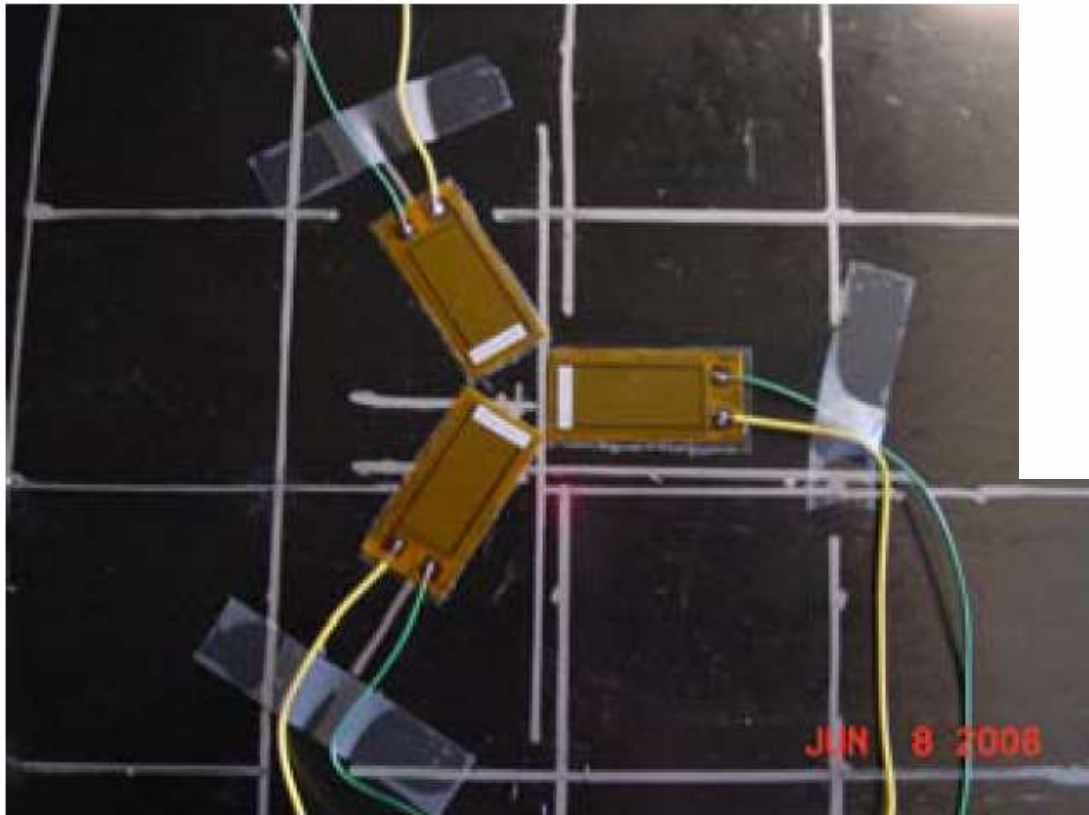
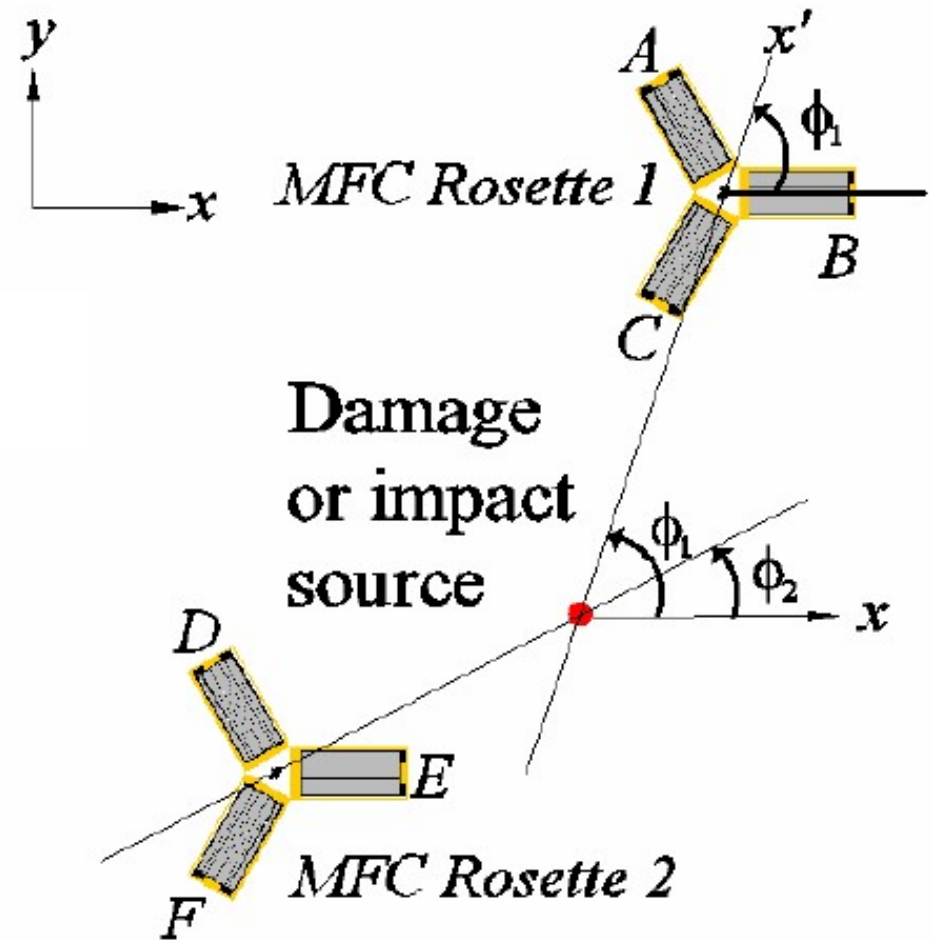
Wykrywanie uszkodzeń - Health monitoring



Elementy próżniowe – zasada działania

Wykrywanie uszkodzeń - Health monitoring

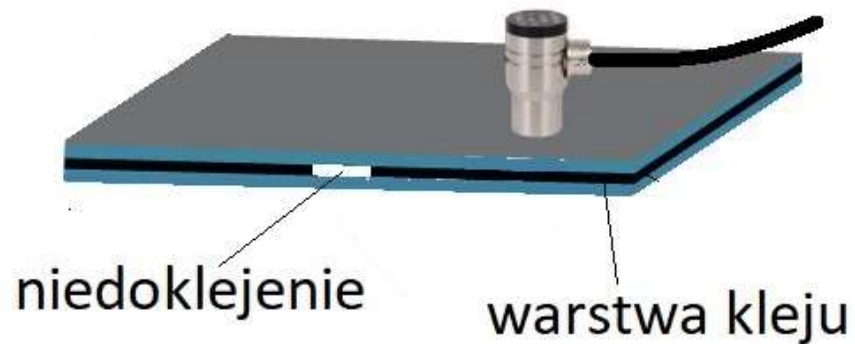
Lokalizacja uszkodzeń



Wykrywanie uszkodzeń - połączenia

Połączenia klejone:

- Ultrasonografia

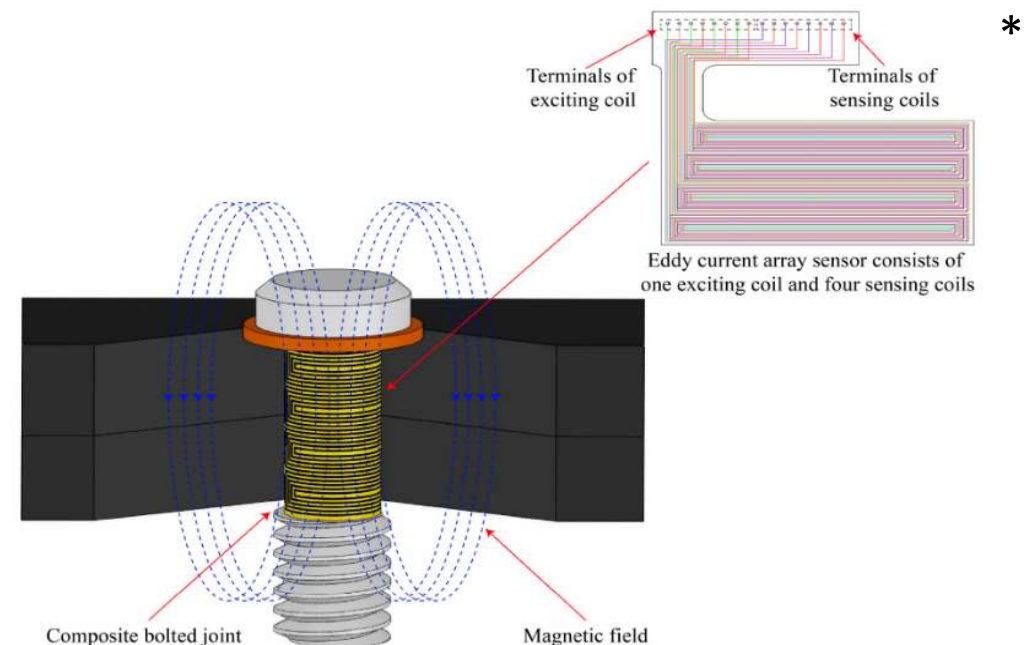


www.olympus-ims.com

- Tomografia

Połączenia sworzniowe:

- Metoda optyczna
- Ultrasonografia
- Tomografia
- Metoda prądów wirowych



Wykryto uszkodzenie I co dalej?

Uszkodzenie jest tak małe, że
nie zagraża bezpieczeństwu
struktury

Cykliczne inspekcje

Uszkodzenie zagraża
bezpieczeństwu struktury

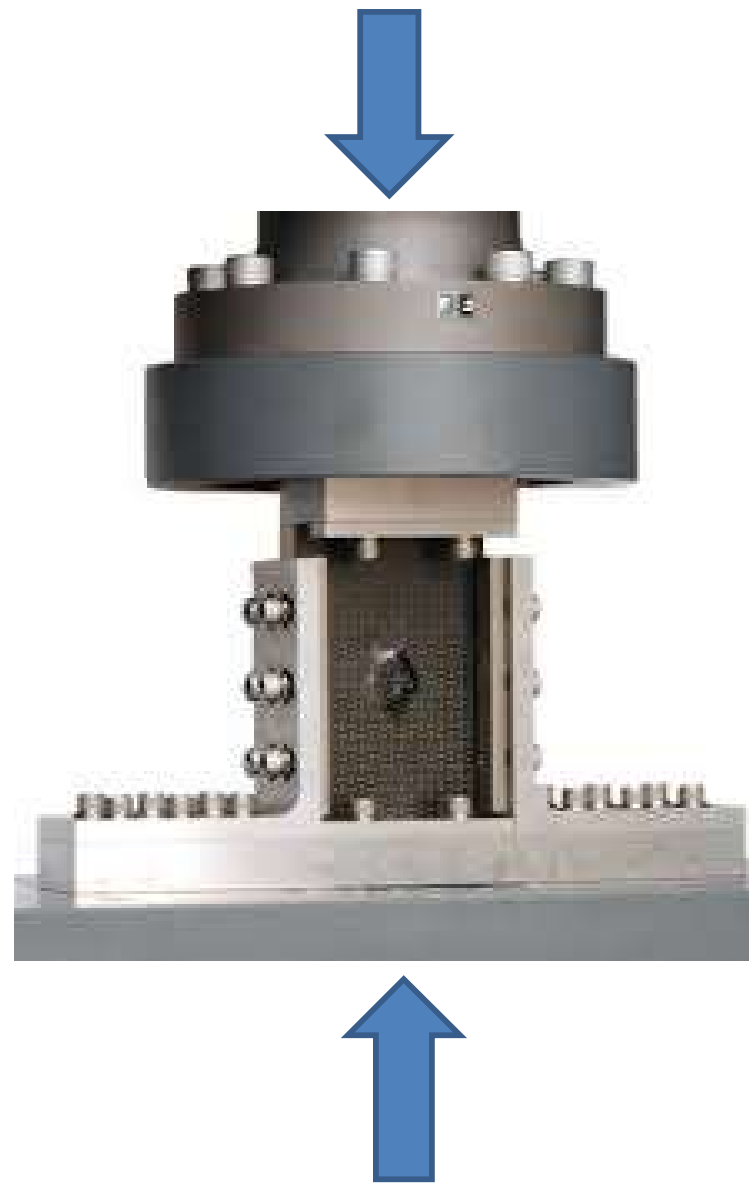
Naprawa struktury

Wymiana elementu



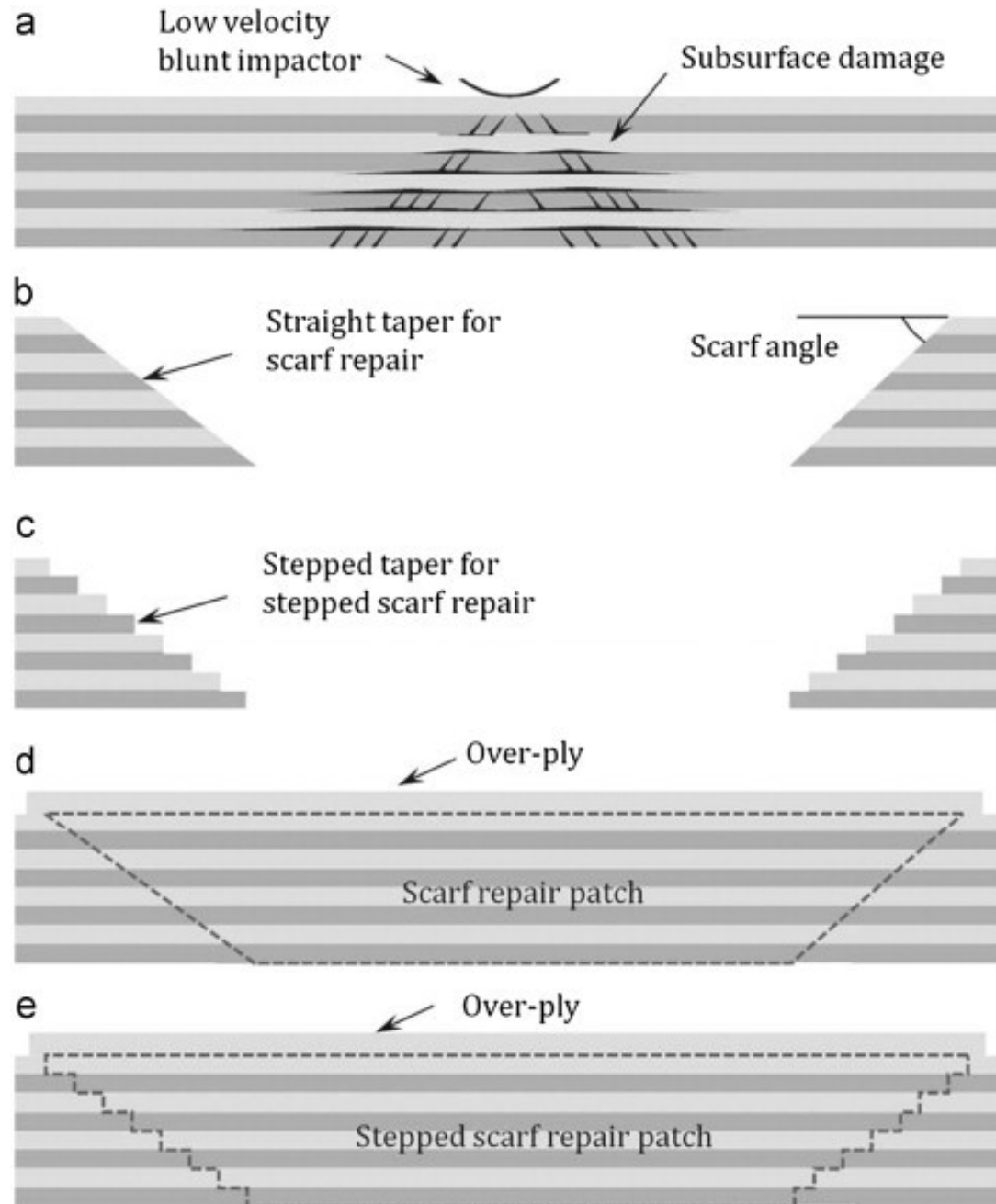
<https://aer24.co.uk/2018/06/03/american-airbus-a319-near-el-paso-on-jun-3rd-2018-severe-hail-strike-pictures-included/>

Metoda badania wzrostu uszkodzeń – Compression after impact (CAI)



Badania mogą być statyczne lub zmęczeniowe

Naprawy



Naprawy



<https://www.compositesworld.com/columns/composite-repair-lessons-learned-challenges-and-opportunities-part-i>

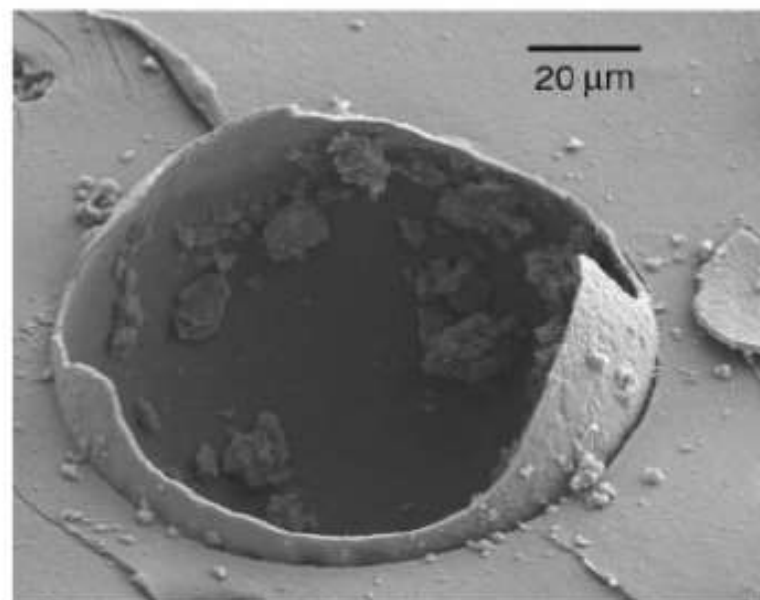
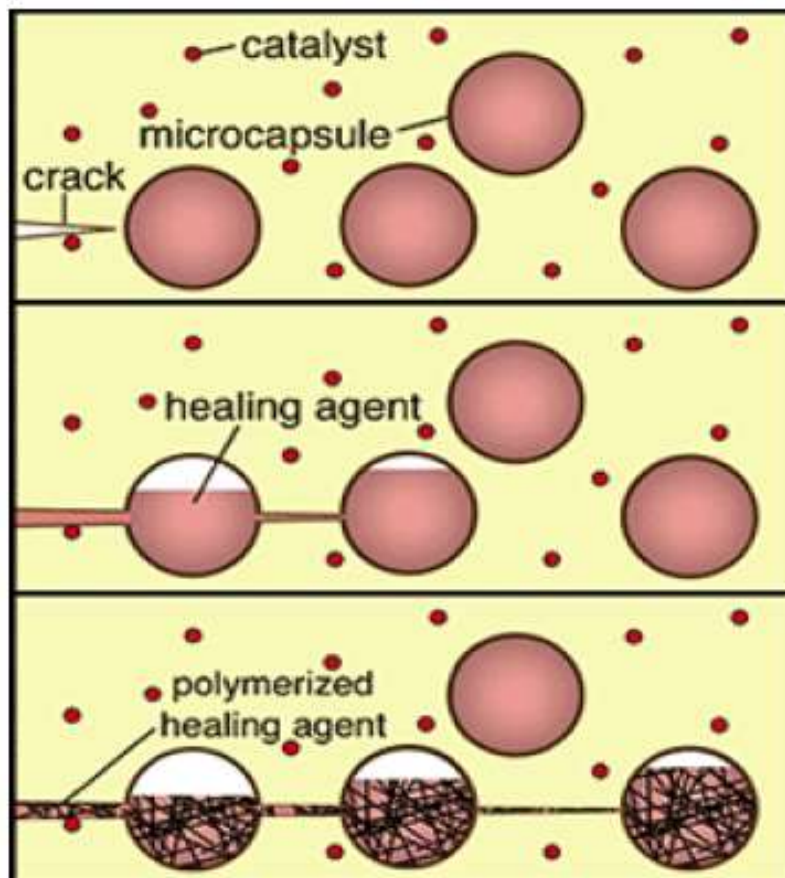
Kompozyt przygotowany do
naprawy metodą 'step'



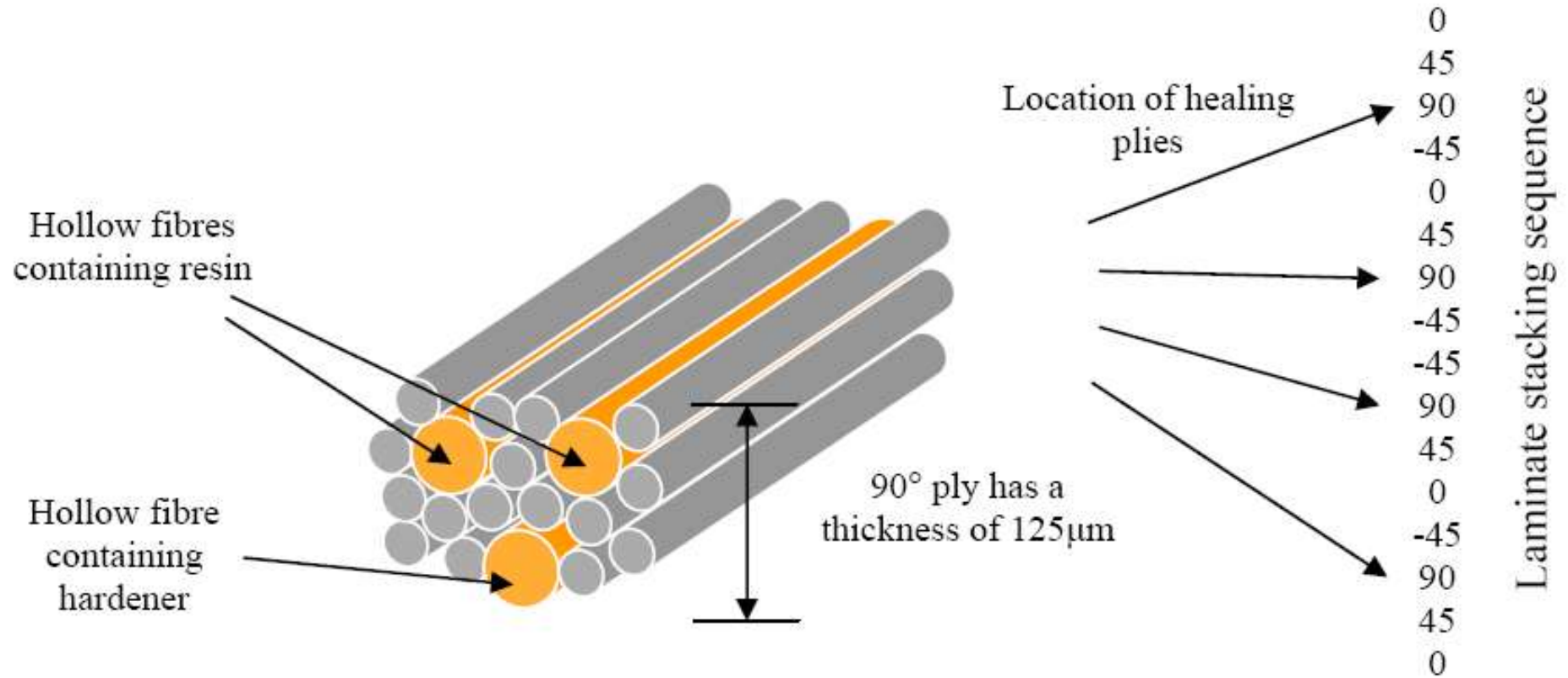
<http://www.aero-consultants.ch/en/Heatcon-Reparaturloesungen/Heatcon-Composite-Repair-Systems.htm>

Naprawa na samolocie

Struktury samoleczące się



Struktury samoleczące się



Struktury samoleczące się

