



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE



Wydział Fizyki i
Informatyki Stosowanej

Badanie materiałów polikrystalicznych w aspekcie optymalizacji ich własności

dr inż. Sebastian Wroński

Ośrodki współpracujące



Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Paris



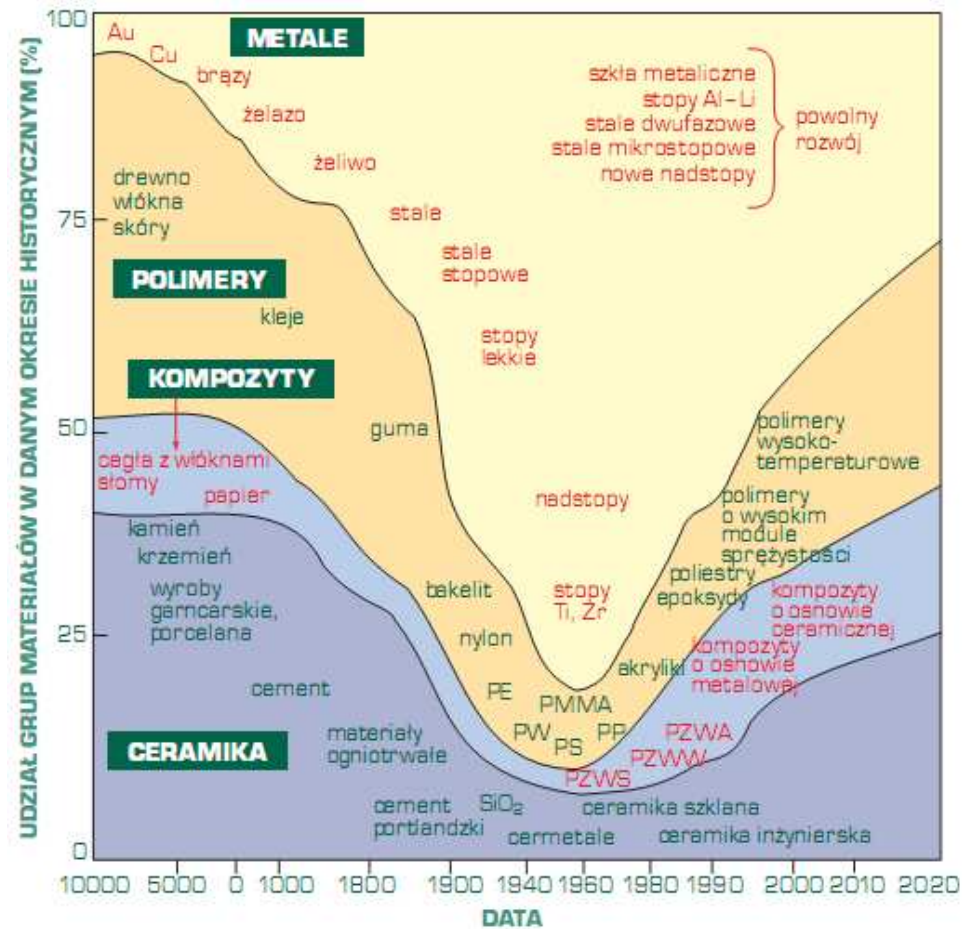
The Open University



ECOLE NATIONALE D'INGENIEURS DE METZ

Modyfikacja własności poprzez:

- Deformacje (walcowanie, ścinanie, rozciąganie itp.)
- Obróbka termiczna (wygrzewanie, rekrytalizacja itp.)



opracowano według M.F. Ashby'ego

Metody badawcze

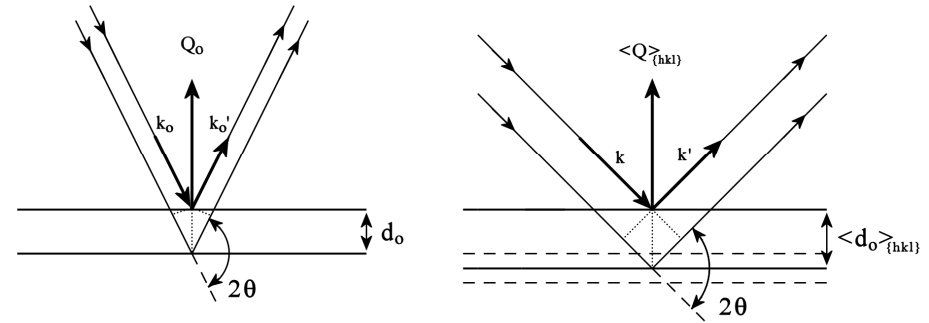
- Mikroskopia optyczna i elektronowa
- Dyfrakcja promieniowania X
- Dyfrakcja promieniowania neutronowego
- Wsteczne rozpraszanie elektronów (Electron Backscatter Diffraction – EBSD)
- Testy mechaniczne (rozciąganie, ściskanie, ścinanie, pomiar mikrotwardości itp.)

Dyfrakcja promieniowania X

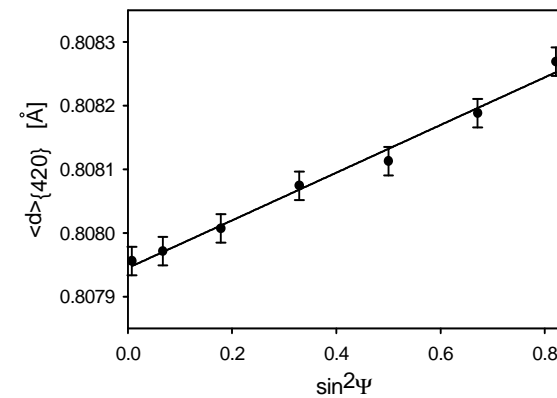
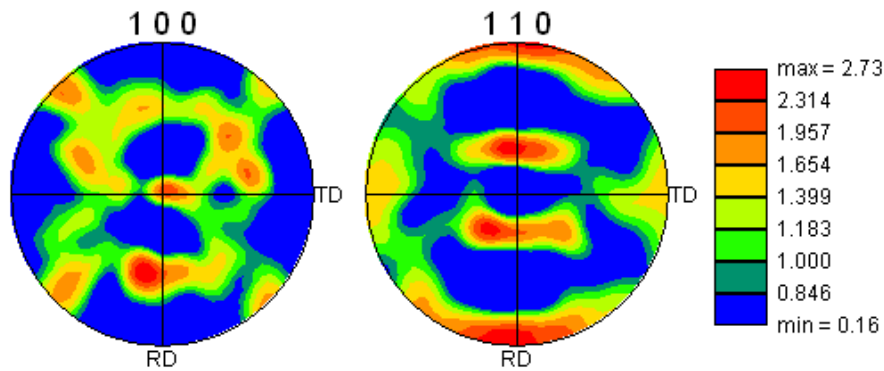
Tekstura krystalograficzna



Napężenia



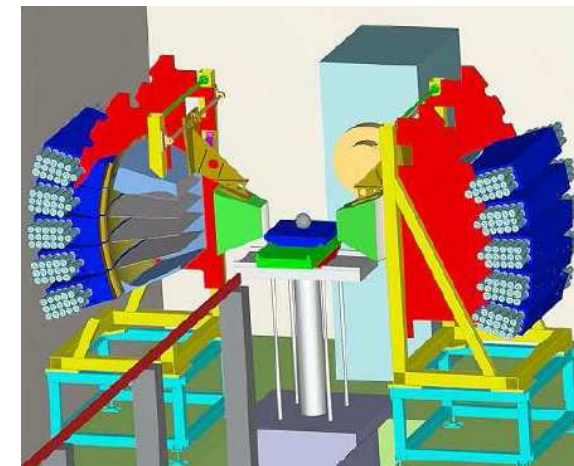
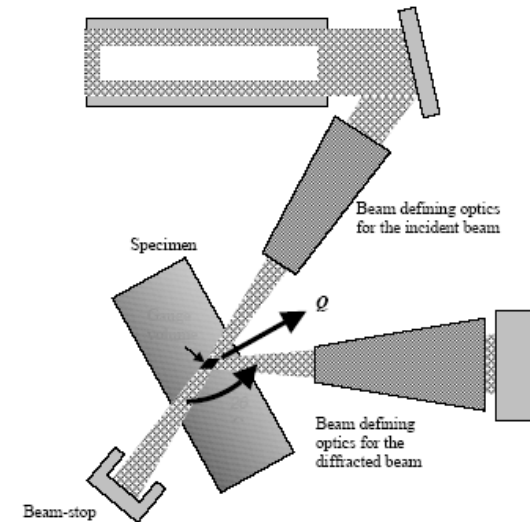
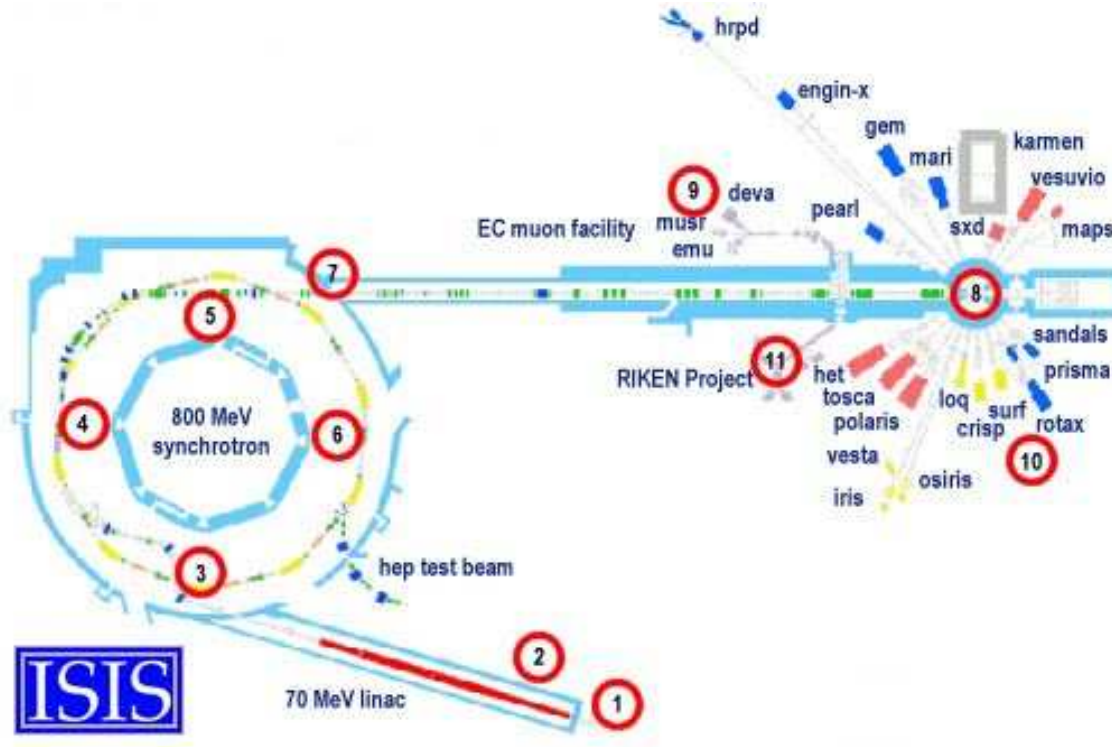
$$\langle \varepsilon_Q \rangle_{\{hkl\}} = \frac{\langle d \rangle_{\{hkl\}} - d_{\{hkl\}}^0}{d_{\{hkl\}}^0}$$



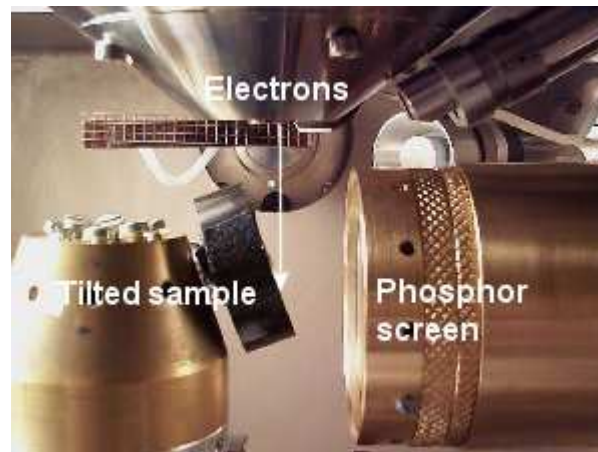
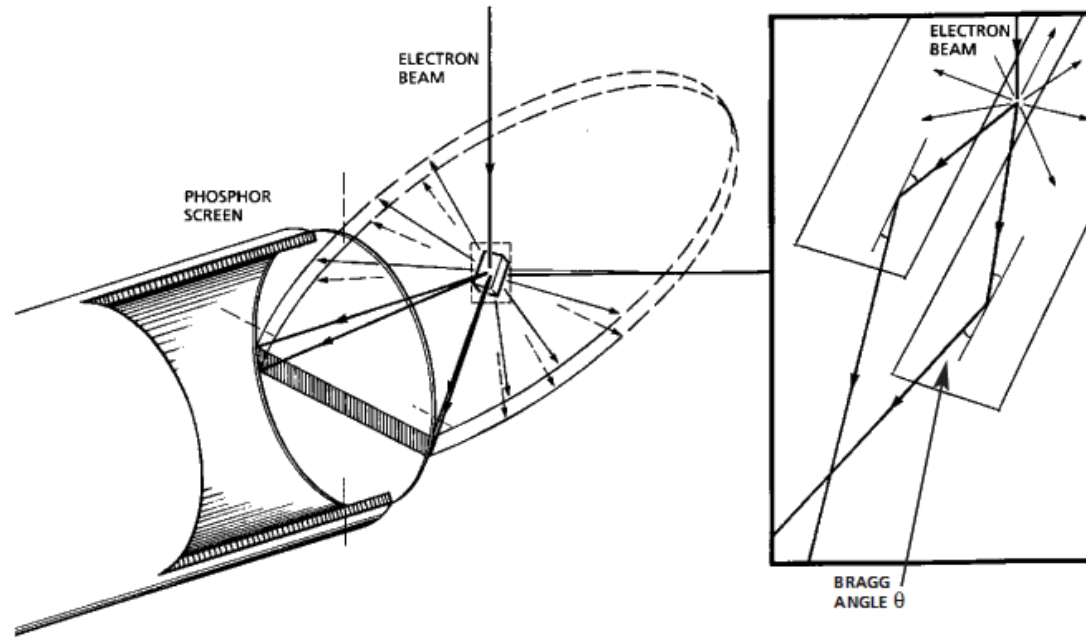
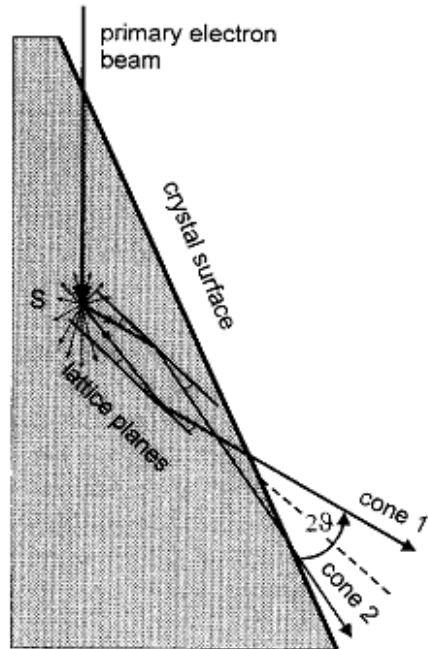
$$\langle d(\psi, \varphi) \rangle_{hkl} = \left[\frac{1}{2} s_2 (\sigma_{11} \cos^2 \varphi + \sigma_{22} \sin^2 \varphi) \sin^2 \psi + s_1 (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \right] d_{hkl}^0 + d_{hkl}^0$$

Dyfrakcja promieniowania neutronowego

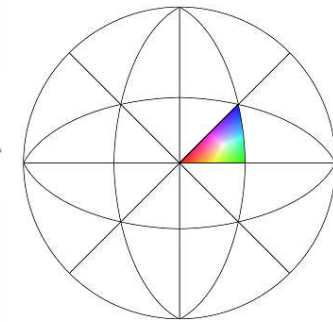
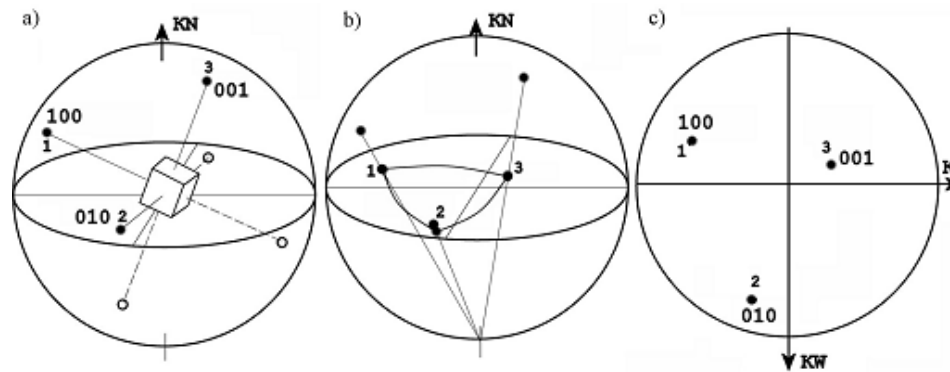
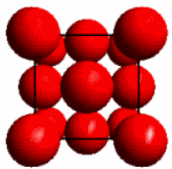
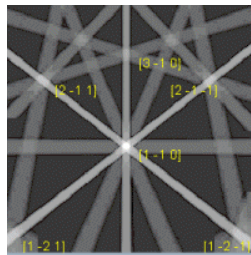
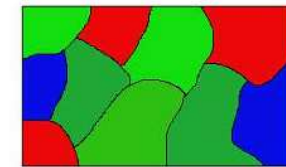
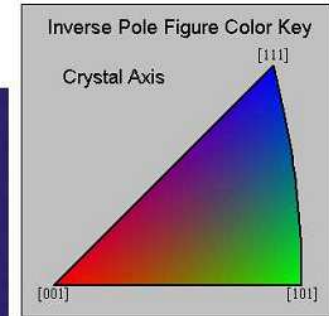
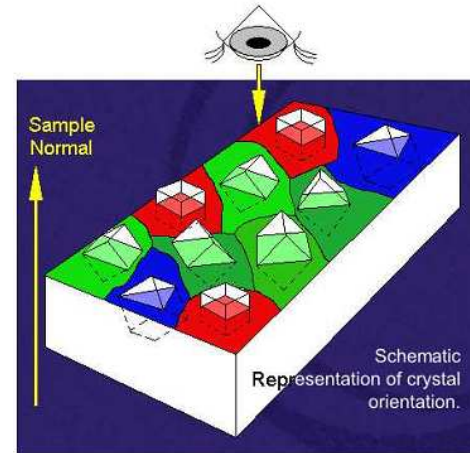
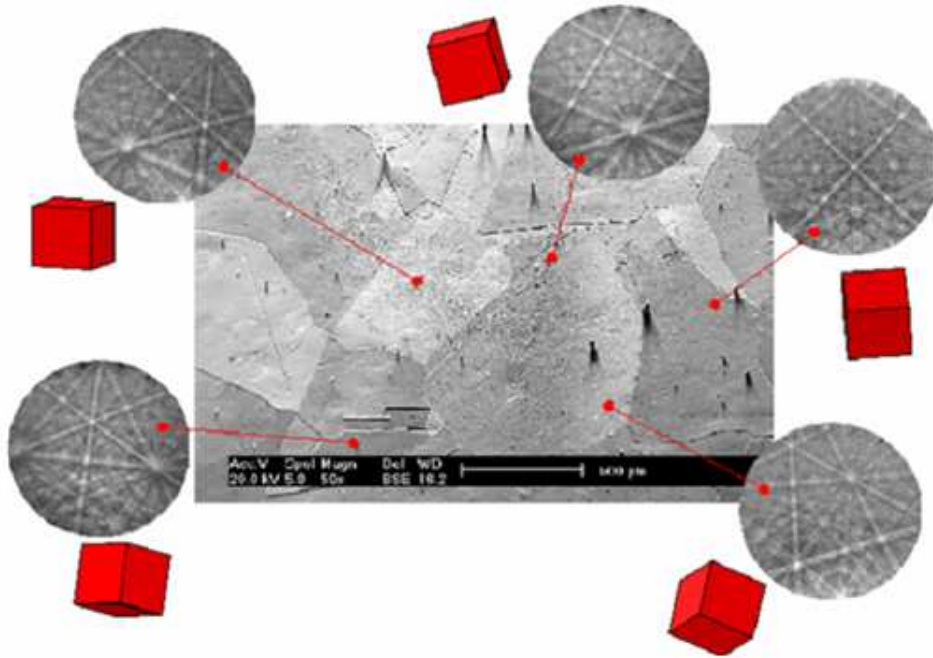
A WORLD CENTRE FOR CONDENSED MATTER SCIENCE WITH NEUTRONS & MUONS



EBSD (Electron Backscatter Diffraction)



EBSD (Electron Backscatter Diffraction)



EBSD (Electron Backscatter Diffraction)

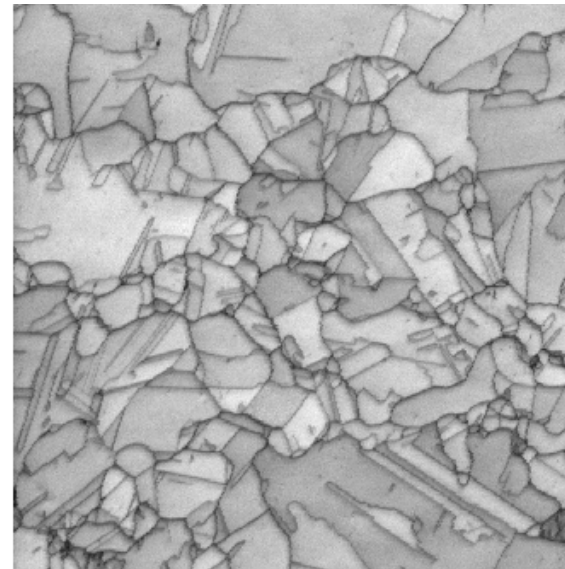
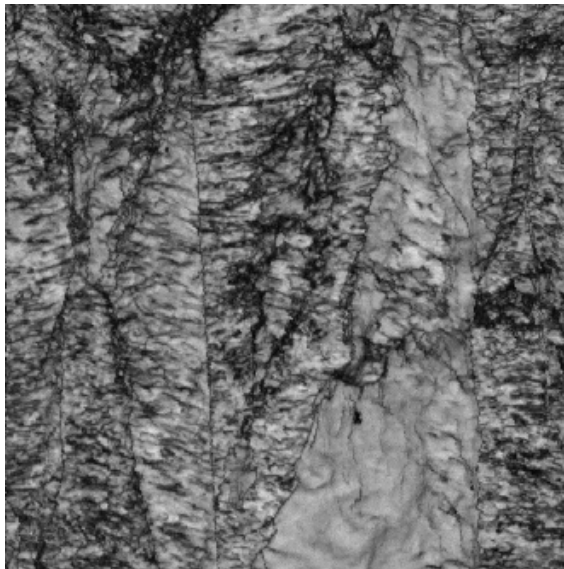
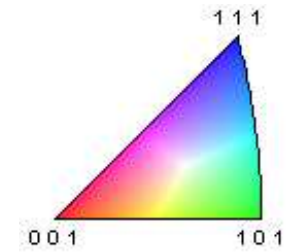
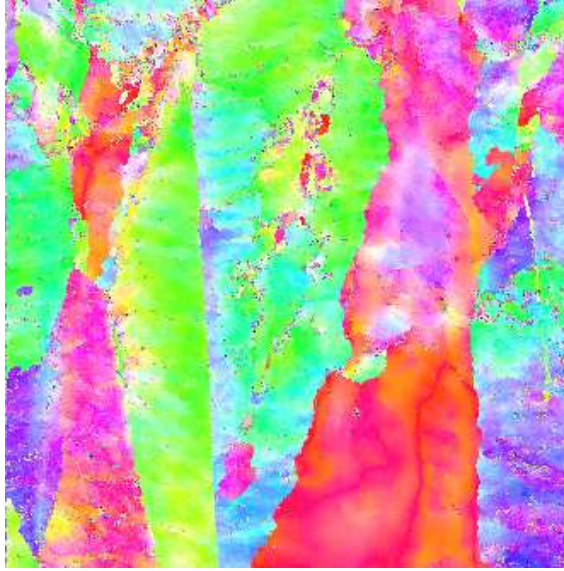


Cambridge S360
Zeiss Supra 40VP



Odkształcana i rekrytalizowana miedź

RD
TD



Modelowanie

Deformacji

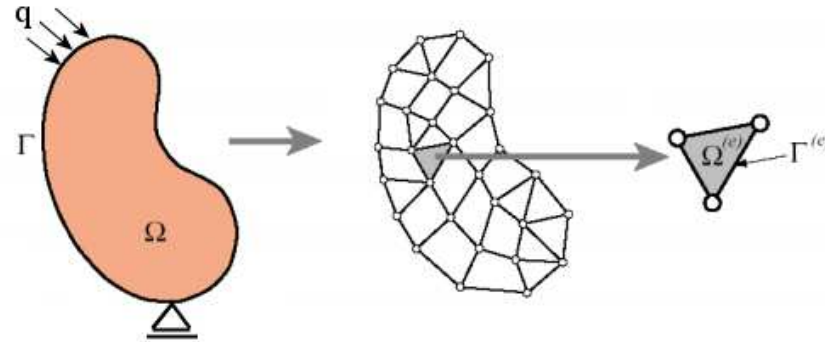
- w skali makro przy użyciu metody elementów skończonych (MES)
- w skali krystalograficznej używając modelu odkształcenia polikryształu (model LW, self-consistent)
- połączone modele makro i krystalograficzny

Rekrystalizacji

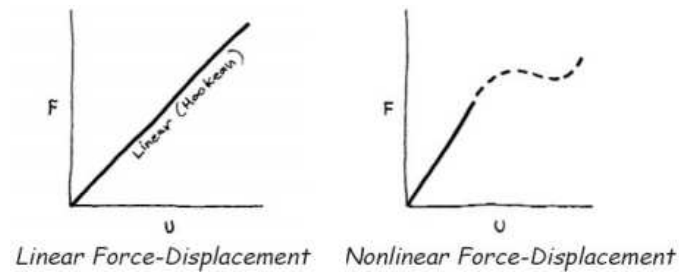
- Model oparty na koncepcji zorientowanego wzrostu zarodków
- Modele oparte na metoda Monte-Carlo
- Model rekrystalizacji typu Vertex

Modelowanie w skali makro

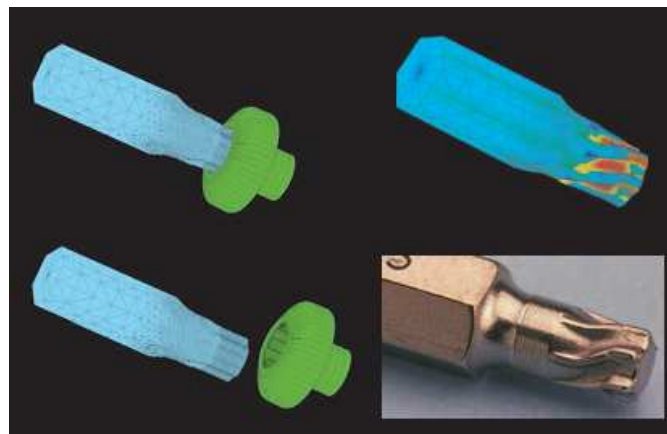
Podział kontinuum na elementy



Wprowadzenie reguł opisujących przemieszczenie węzłów oraz warunków brzegowych

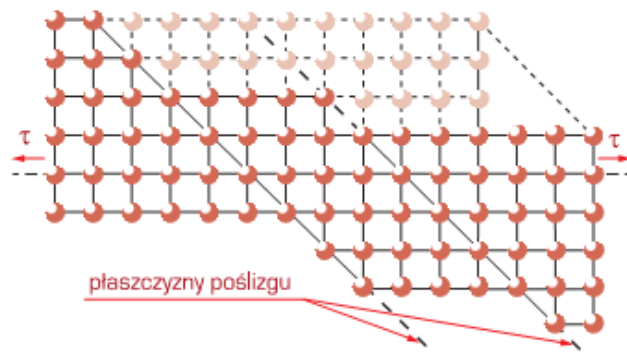


Wynik

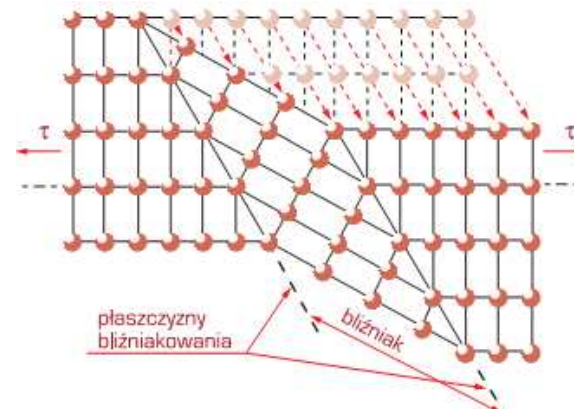


Modelowanie w skali krystalograficznej

Mechanizmy odkształcenia plastycznego



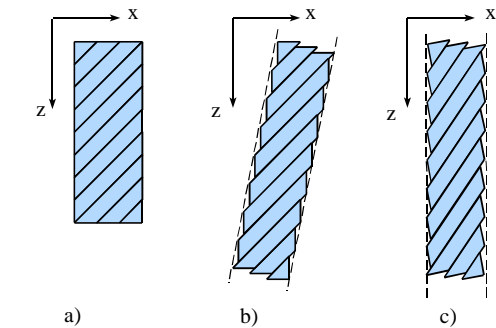
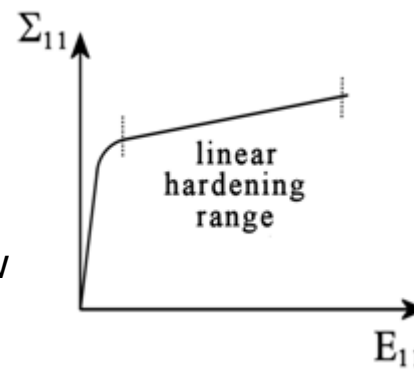
Poślizg krystalograficzny



Bliźniakowanie (Twinning)

$$\tau = \tau_{cr} \quad \text{Prawo Schmid'a}$$

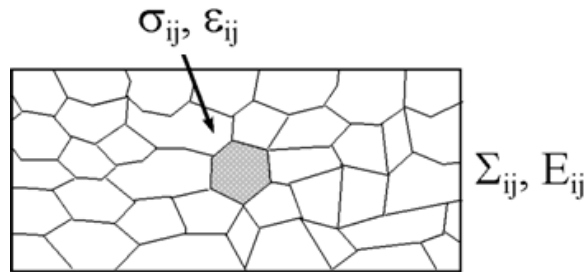
$$\Delta \tau_{cr}^i = \sum_j H^{ij} \Delta \gamma^j \quad \text{Umocnienie systemów poślizgu}$$



Obrót kryształitów w wyniku deformacji

Modelowanie w skali krystalograficznej

Model deformacji plastycznej



$$\Sigma_{ij}, E_{ij} \Leftrightarrow \sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}$$

$$\dot{\sigma}_{ij} = \dot{\Sigma}_{ij} + L_{ijkl}^* (\dot{E}_{kl}^{pl} - \dot{\varepsilon}_{kl}^{pl})$$

Sachs model

$L^* = 0$ - brak oddziaływań między ziarnami – jednorodny rozkład naprężeń $\sigma_{ij} = \Sigma_{ij}$

Taylor model

$L^* \rightarrow \infty$ - jednorodna deformacja ziaren w całej próbce

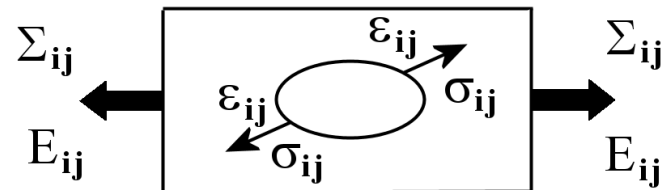
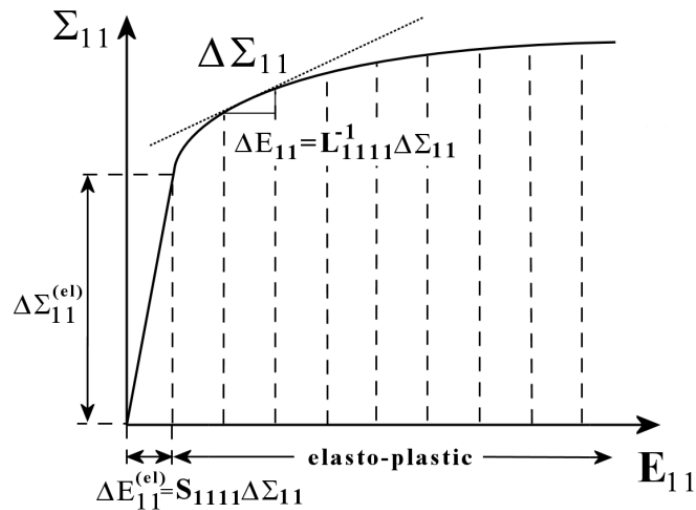
$$\varepsilon_{ij}^{pl} = E_{ij}^{pl}$$

LW model (with compromise interaction)

$L^* = \alpha\mu$ - oddziaływanie bliskie rzeczywistemu (μ moduł ścinania α współczynnik akomodacji elasto-plastycznej)

Modelowanie w skali krystalograficznej

Model samouzgodniony (self-consistent model)



W części elastycznej :

$$\Sigma_{ij} = C_{ijkl} E_{kl} \quad \text{and} \quad \sigma_{ij}^I = c_{ijkl}^I \varepsilon_{kl}^I$$

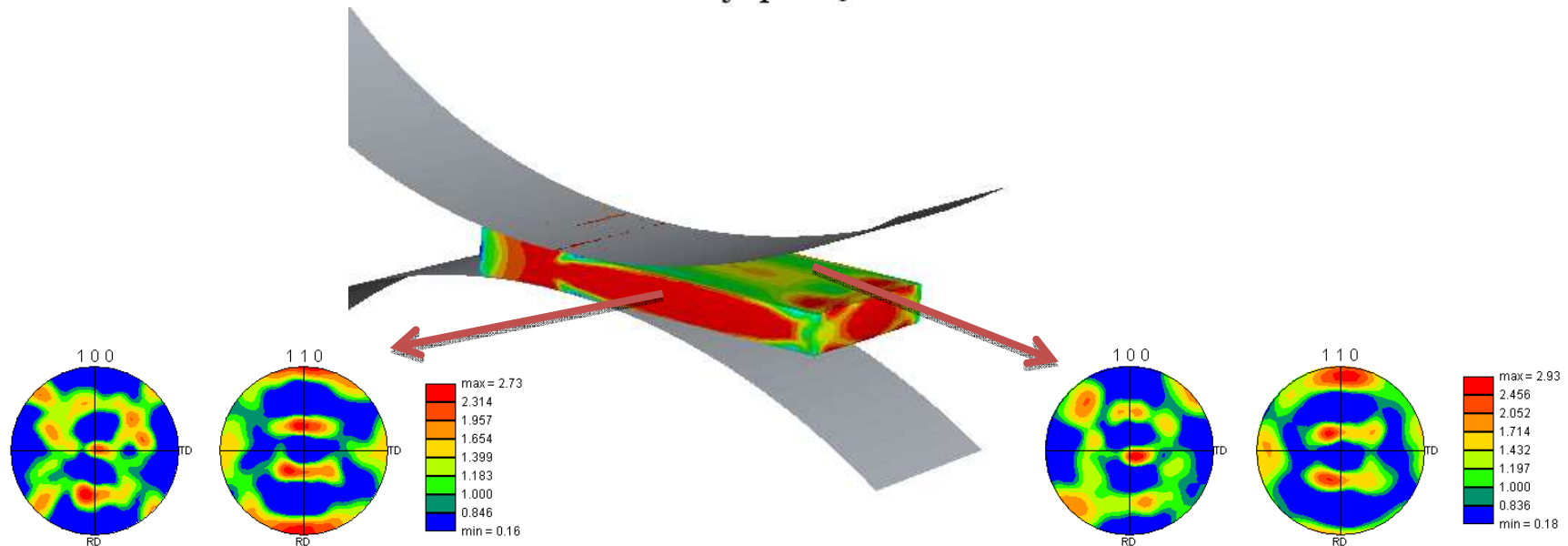
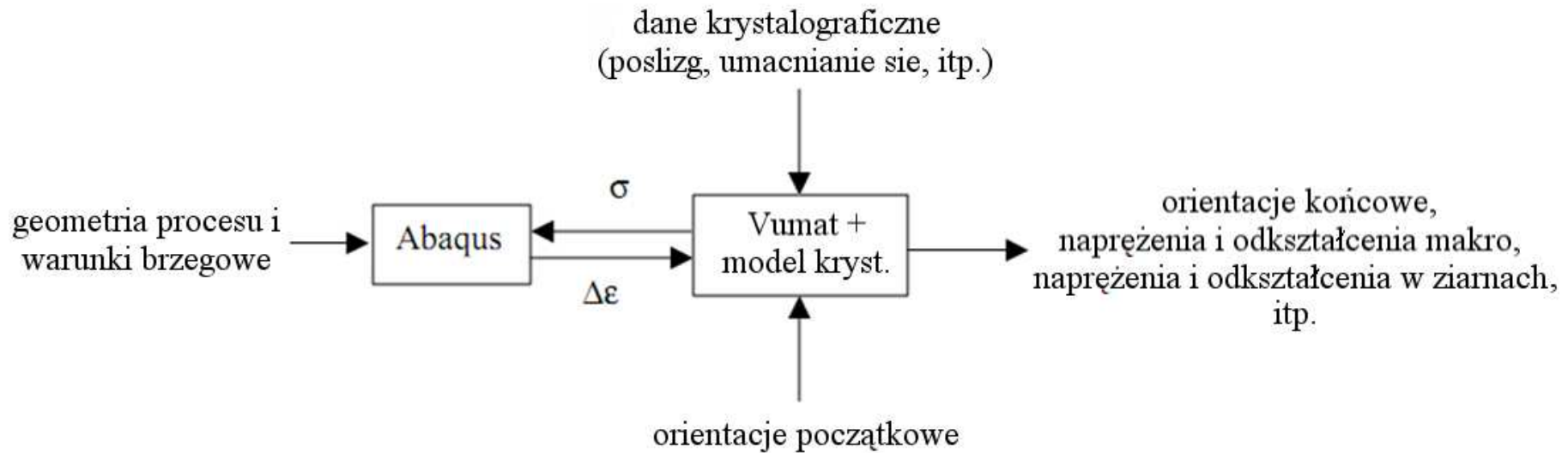
W części plastycznej :

$$\Delta \Sigma_{ij} = L_{ijkl} \Delta E_{kl} \quad \text{and} \quad \Delta \sigma_{ij}^I = l_{ijkl}^I \Delta \varepsilon_{kl}^I$$

Tensor koncentracji :

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^I = A_{ijkl}^I \dot{E}_{kl} \quad \dot{\sigma}_{ij}^I = B_{ijkl}^I \dot{\Sigma}_{kl}$$

Połączenie modeli makro i krystalograficznych



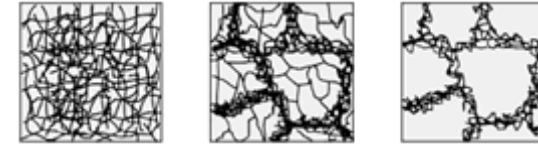
Modelowanie rekrytalizacji

Etapy rekrytalizacji :

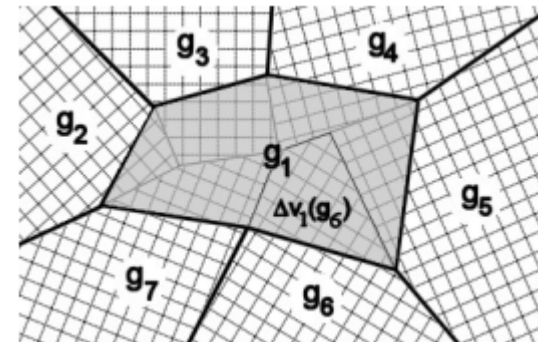
- Zdrowienie
- Rekrytalizacja pierwotna
- Rekrytalizacja wtórna
- Rekrytalizacja trzecio-rzędowa

Modele rekrytalizacji

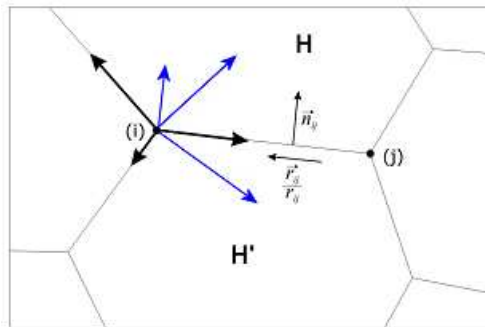
- Model oparty na koncepcji zorientowanego wzrostu zarodków – model rekrytalizacji statystycznej
- Modele oparte na metoda Monte-Carlo
- Model rekrytalizacji typu Vertex



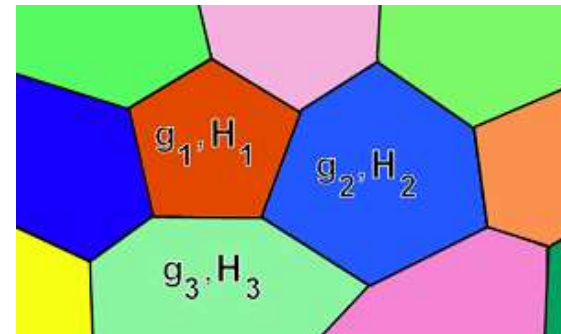
Rekonfiguracji dyslokacji



Ziarno o orientacji g1 zanika na rzecz rozrastających się ziaren g2-g7

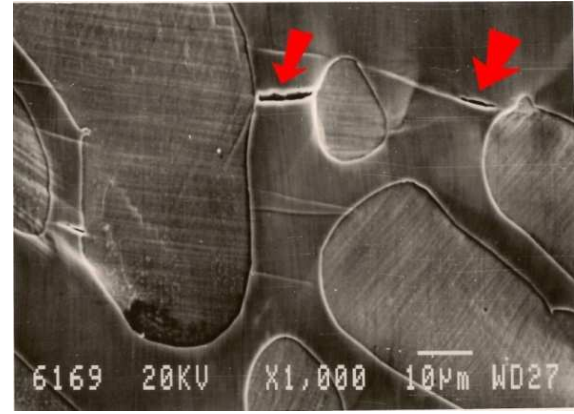
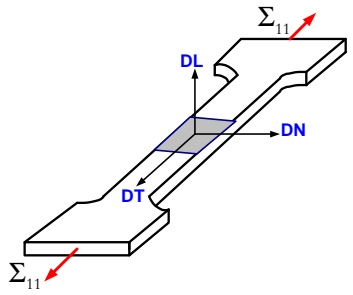
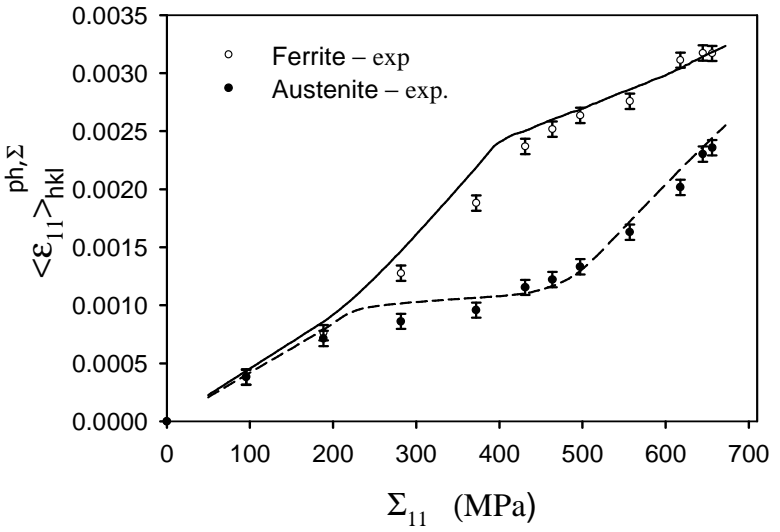


Rozkład sił działający na każdy vertex



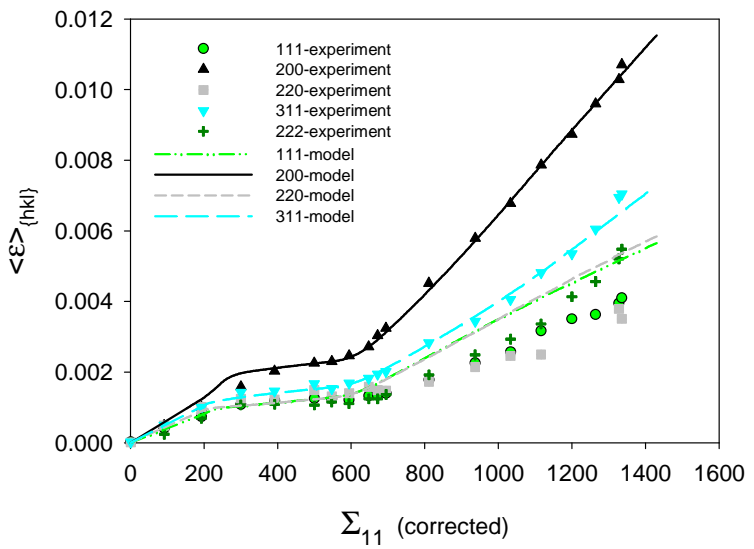
Vertexowa reprezentacja mikrostruktury

Stal dwufazowa

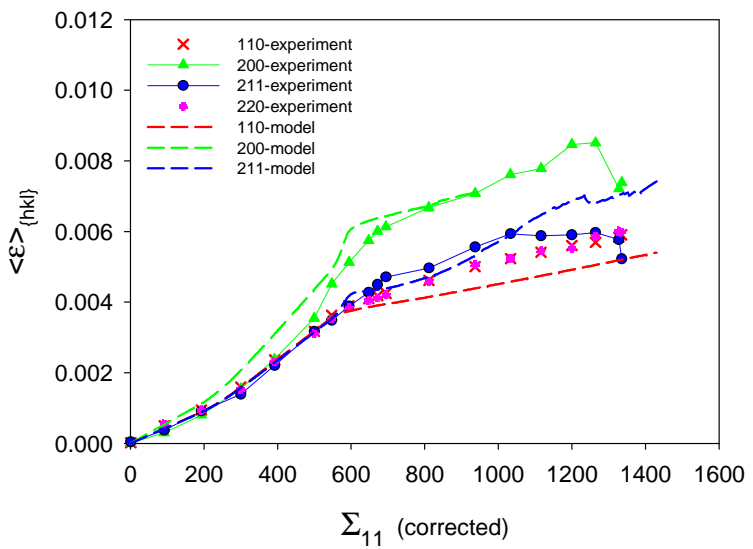


Damage in ferritic phase after elast-oplastic deformation (SEM).

Austenite



Ferrite

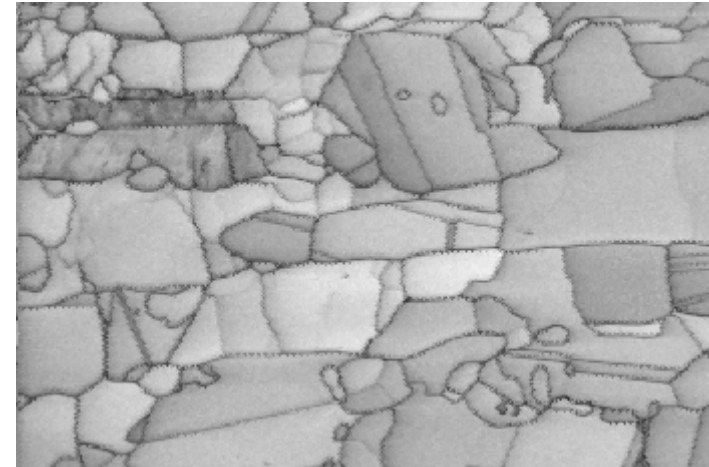
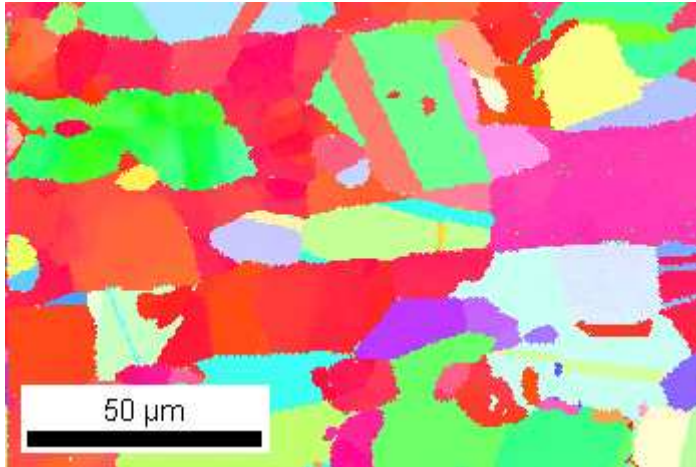


Stal dwufazowa

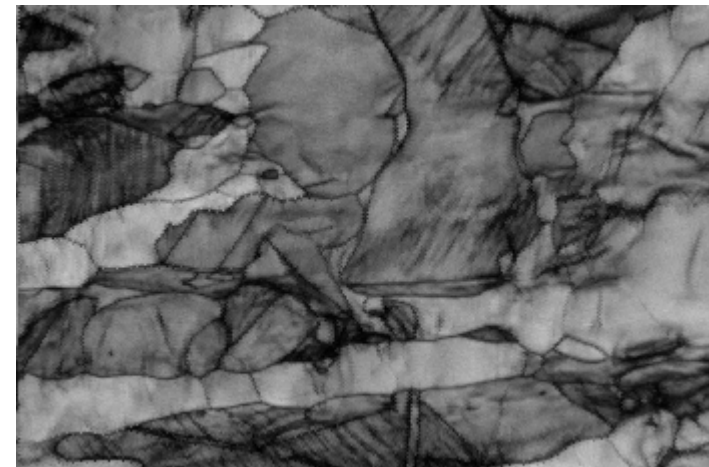
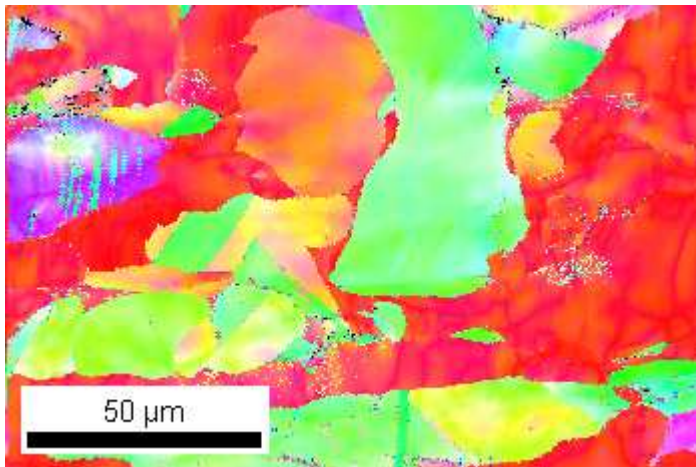
Orientation map (alpha and gamma)

IQ map (alpha and gamma)

Material
nieodkształcony

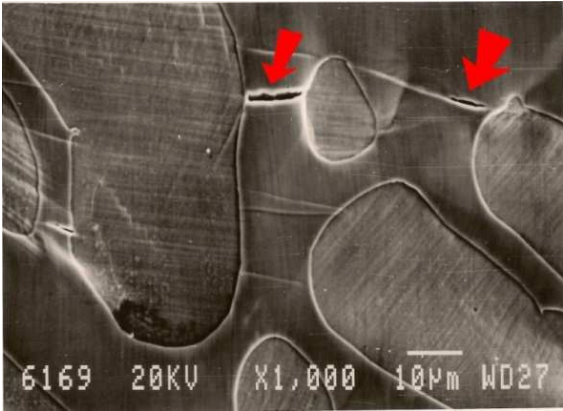
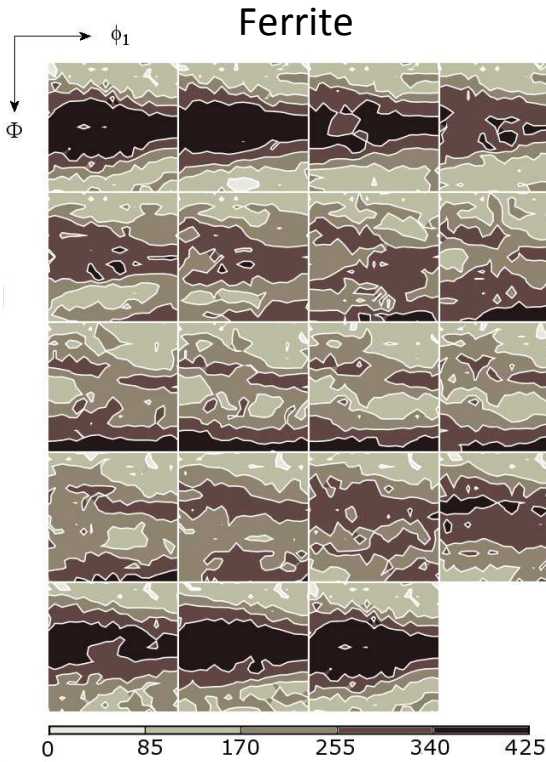
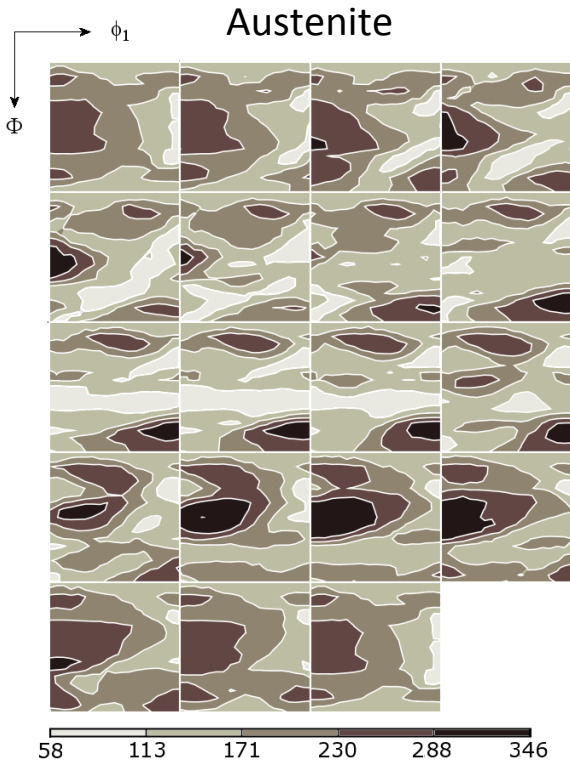
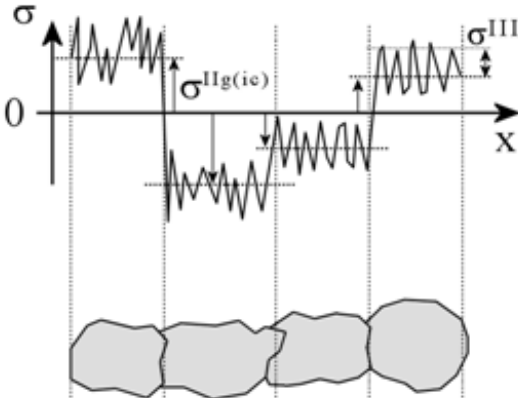


Material
odkształcony



Stal dwufazowa

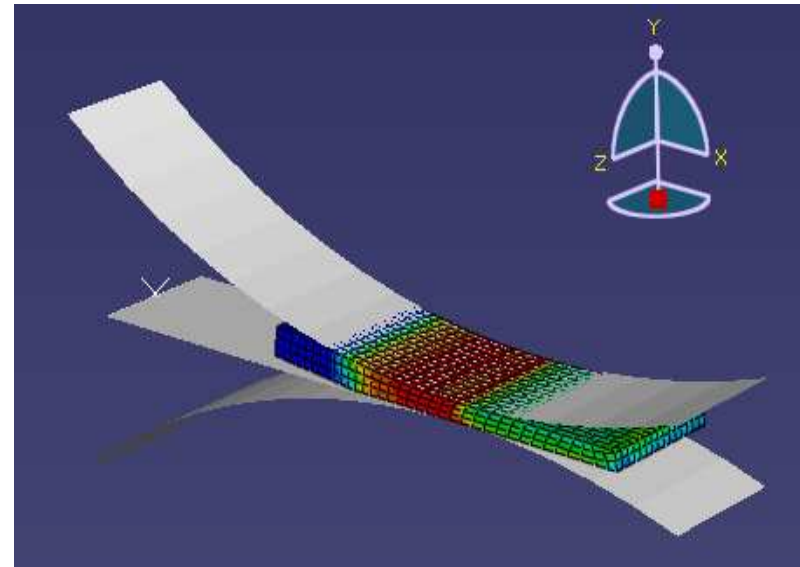
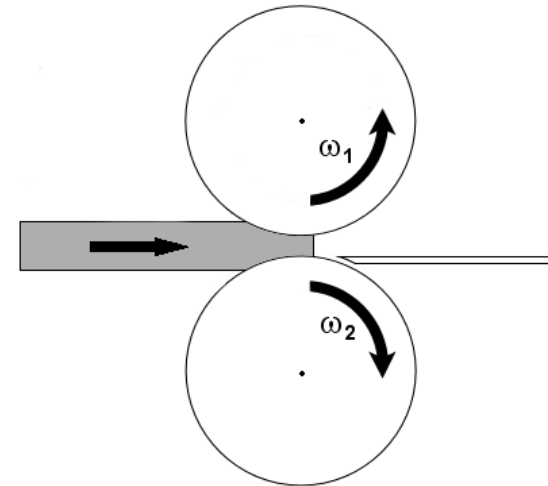
$$\langle d(\psi, \varphi) \rangle_{hkl} = \left[F_{ij}(R_{ij}, \psi, \varphi) \sigma_{ij}^I + \langle \varepsilon_{33}'(\psi, \varphi) \rangle_{hkl}^{NP} \right] d_{hkl}^0 + d_{hkl}^0$$



Damage in ferritic phase after elastoplastic deformation (SEM).

Optymalizacja procesów przemysłowych

Walcowanie asymetryczne



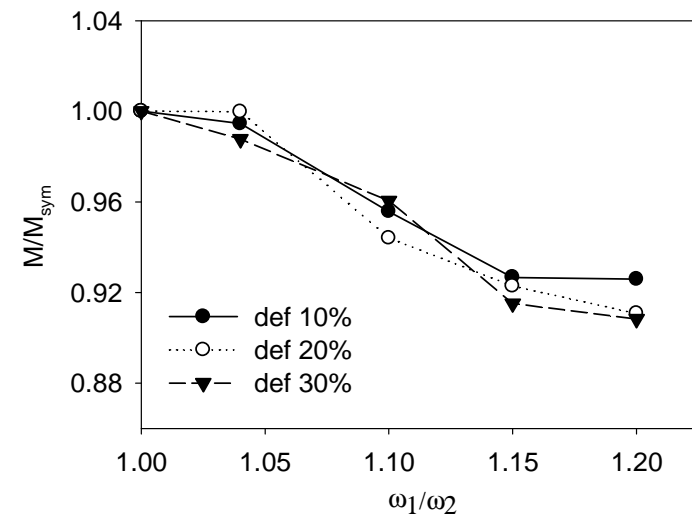
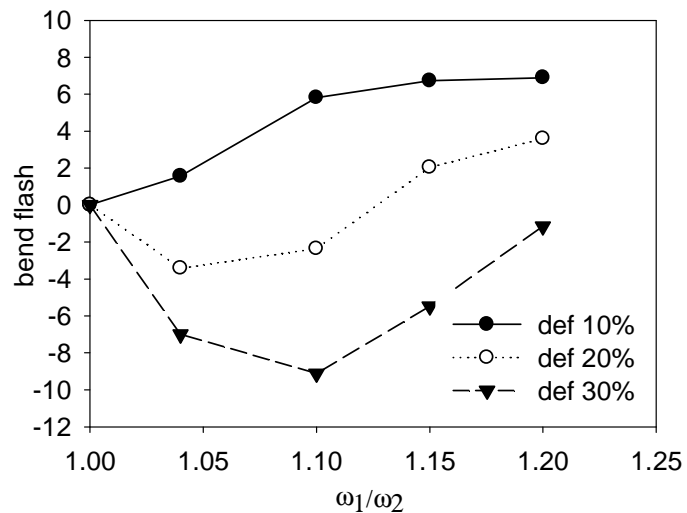
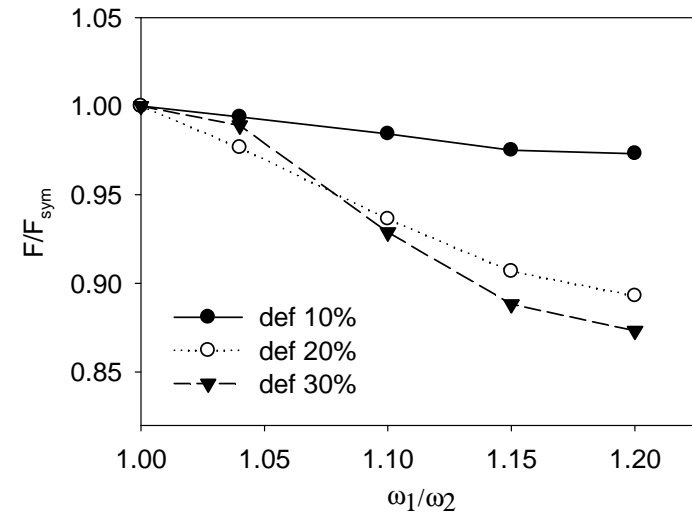
Walcowanie asymetryczne

Zalety

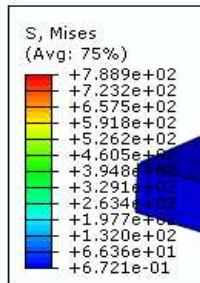
- Mniejsza siła nacisku
- Mniejszy moment siły
- Jednorodna tekstura

Wady

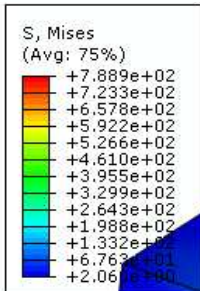
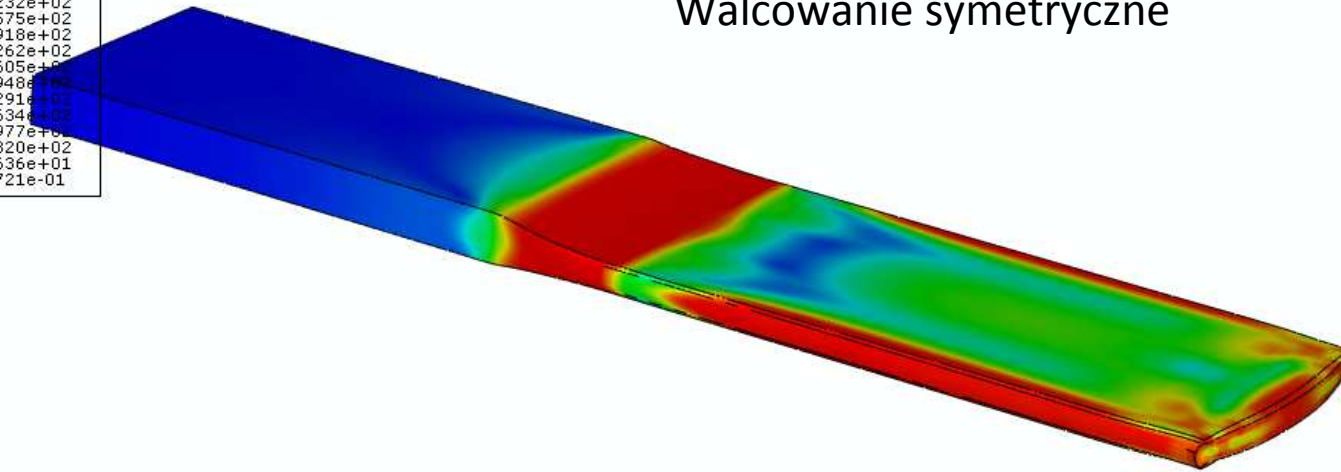
- Wygięcie próbki



Symulacja procesu walcowania

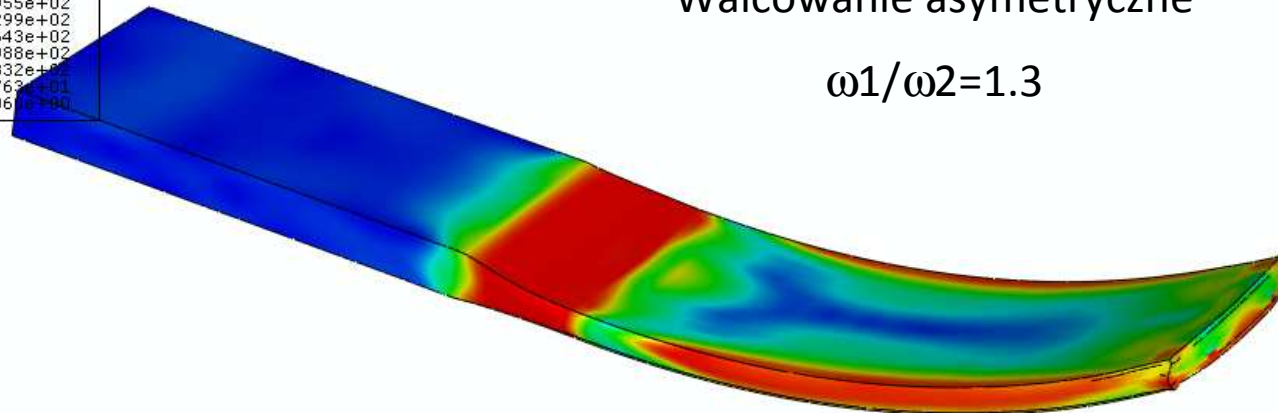


Walcowanie symetryczne



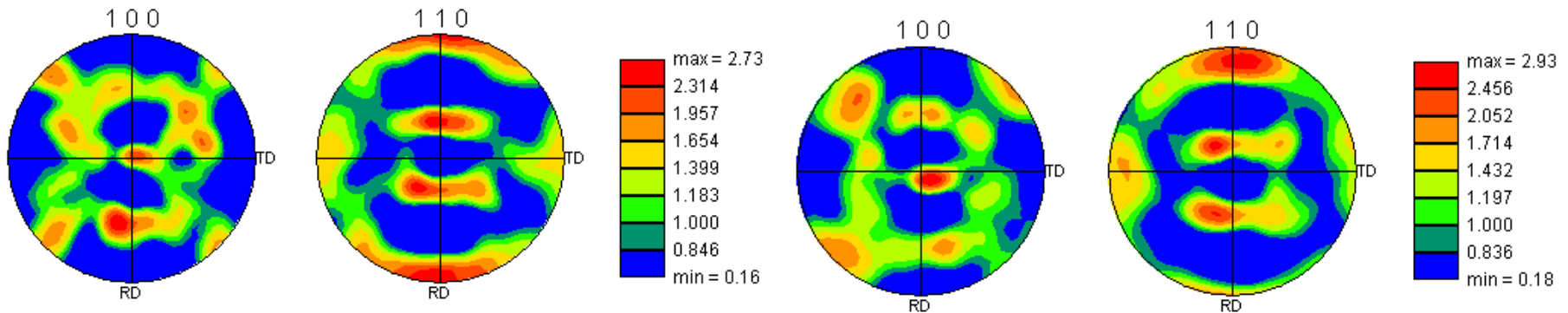
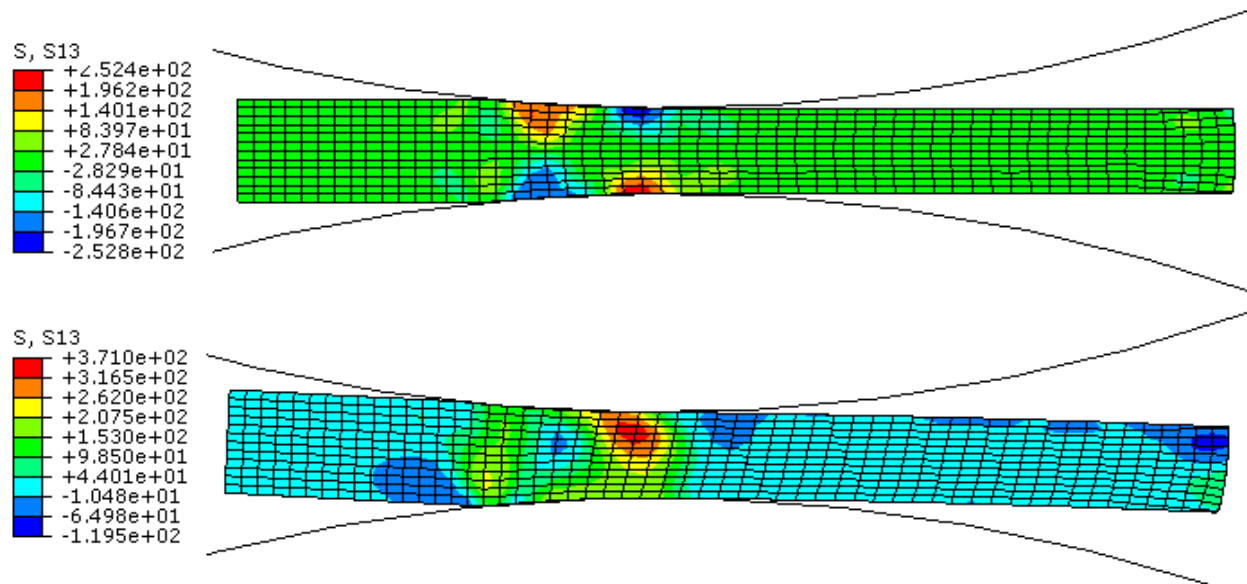
Walcowanie asymetryczne

$$\omega_1/\omega_2=1.3$$



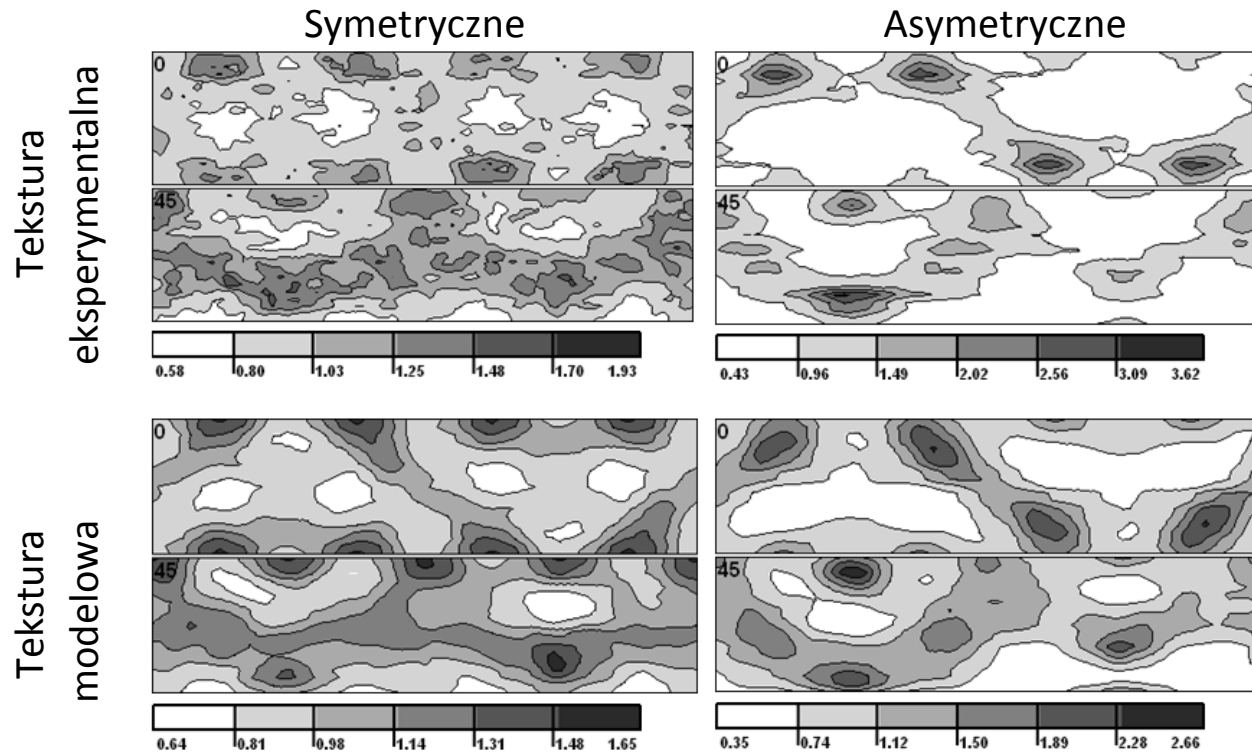
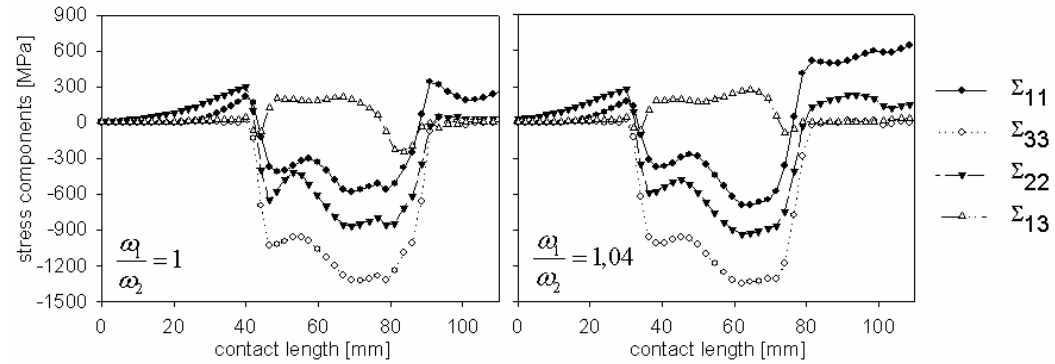
Symulacja procesu walcowania

Rozkład naprężeń

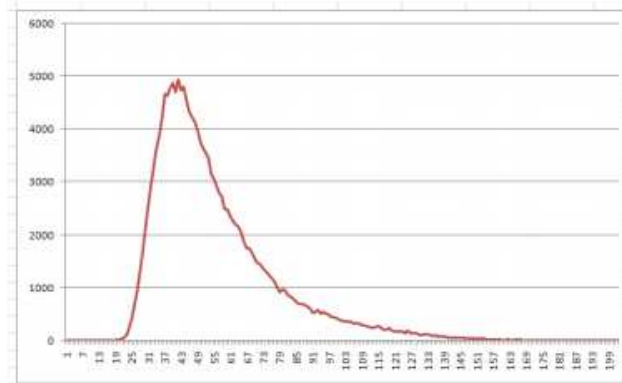
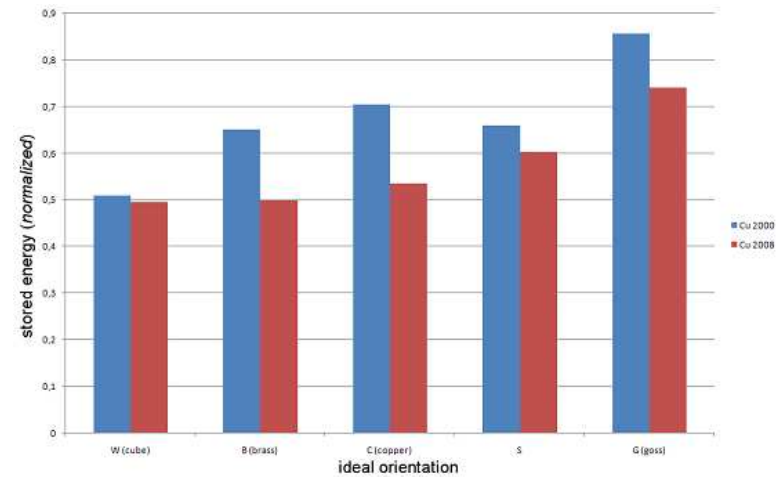
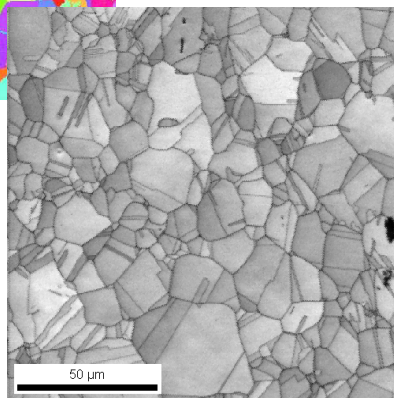
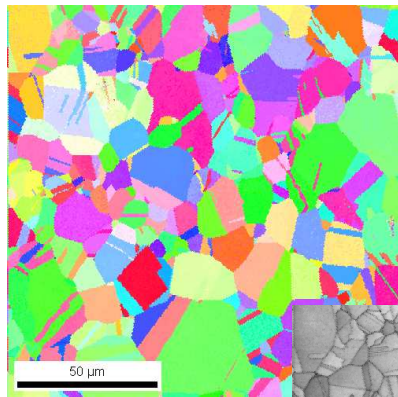


Walcowanie asymetryczne

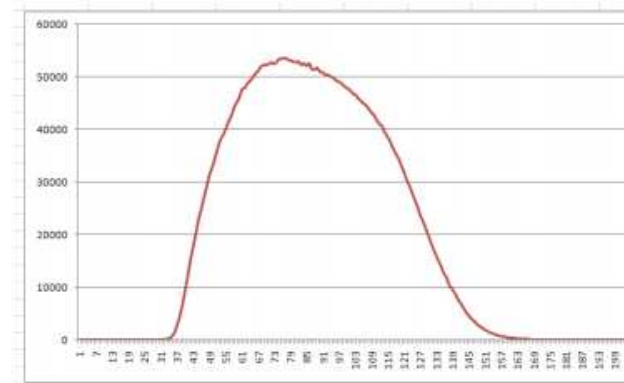
MES + krystalograficzny model deformacji



Badanie efektów starzenia



Number of points having various IQ (2000)



Number of points having various IQ (2008)

Wykład obieralny dla studentów WFiS

Wprowadzenie do metody elementów skończonych

czym jest MES, idea podziału ośrodka na elementy, przykład prostej kratownicy – budowa macierzy sztywności, agregacja, wprowadzanie warunków brzegowych

Metody aproksymacyjnego rozwiązywania równań różniczkowych

Metoda Ritza

Metoda Rayleigha – Ritza

Metody ważonych rezidów (Metoda kolokacyjna, Metoda najmniejszych kwadratów, Metoda Galerkina)

Typ elementów skończonych i ich własności

Elementy 1D , 2D , 3D, pierwszego i drugiego rzędu.

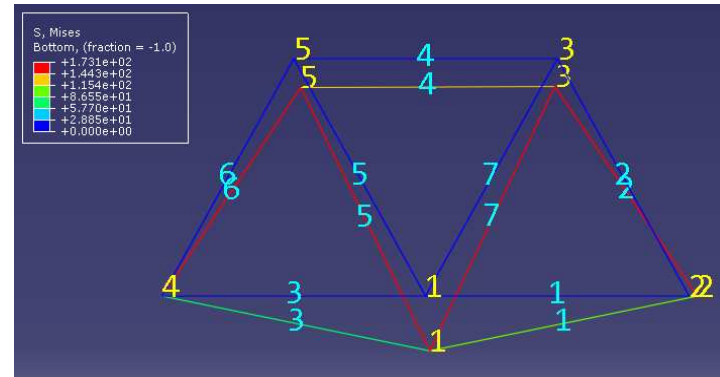
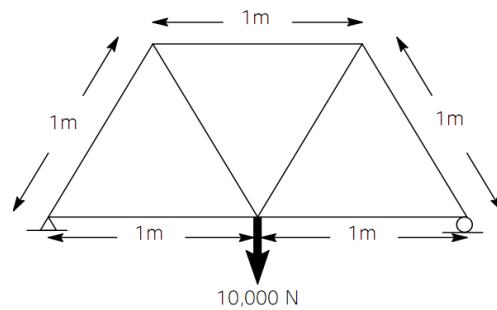
MES w zagadnieniach dynamicznych

Błędy w rozwiązaniach MES

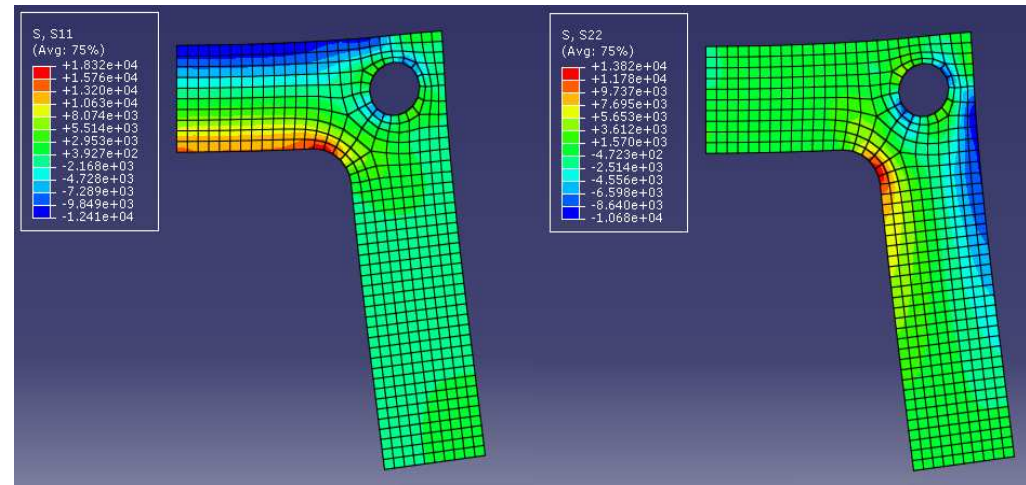
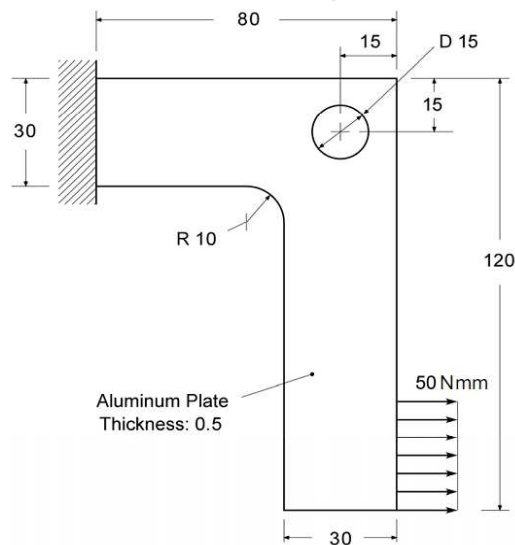
Ćwiczenia praktyczne z zastosowaniem systemu ABAQUS

Obliczenia MES – wykład obieralny dla studentów WFiIS

Ćwiczenie 1 – statyczna analiza prostej kratownicy 2D

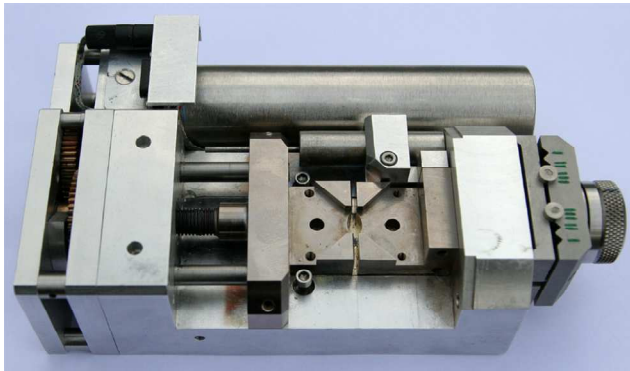


Ćwiczenie 2 – statyczna analiza wspornika 2D

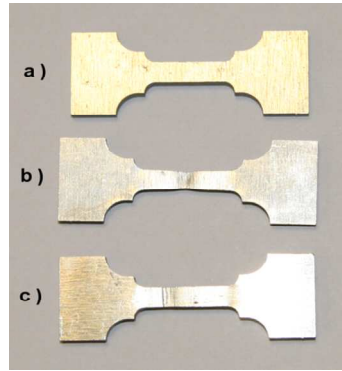


Obliczenia MES – wykład obieralny dla studentów WFiS

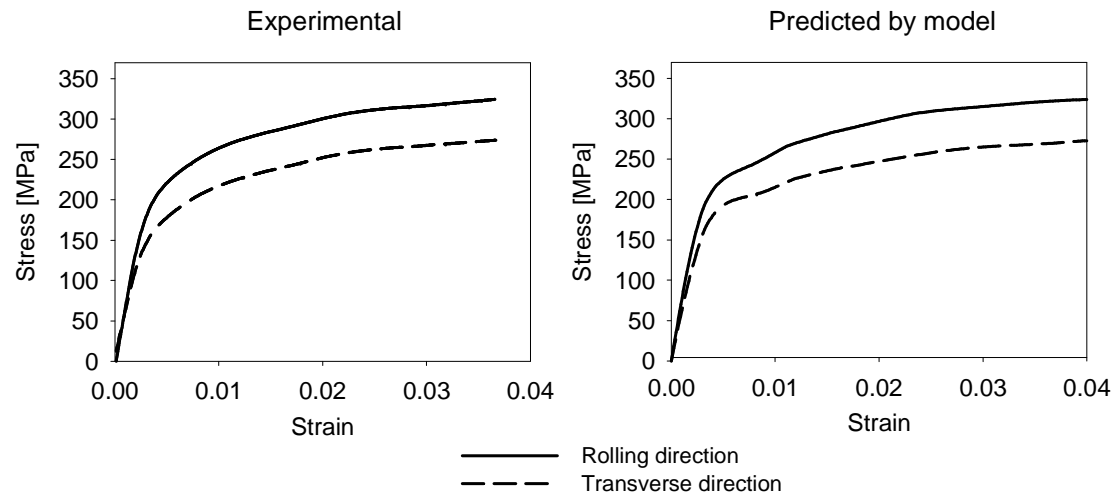
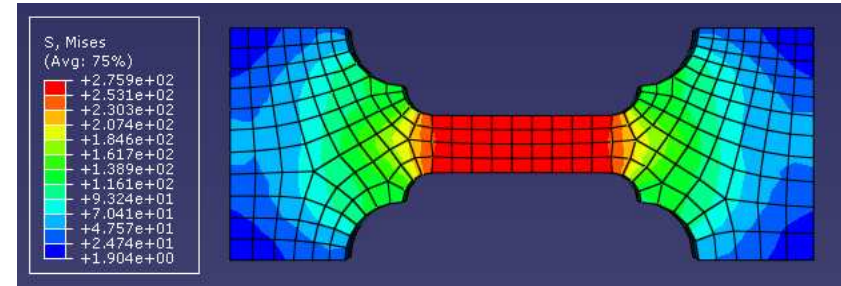
Ćwiczenie 3 – analiza materiałów anizotropowych 3D



Maszyna rozciągająca użyta podczas eksperymentu



a) próbka przed odkształceniem
b) próbka rozciągana w kierunku poprzecznym
c) próbka rozciągana w kierunku walcowania

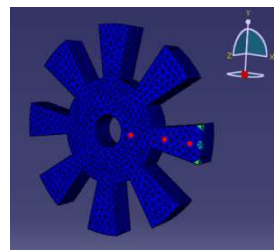
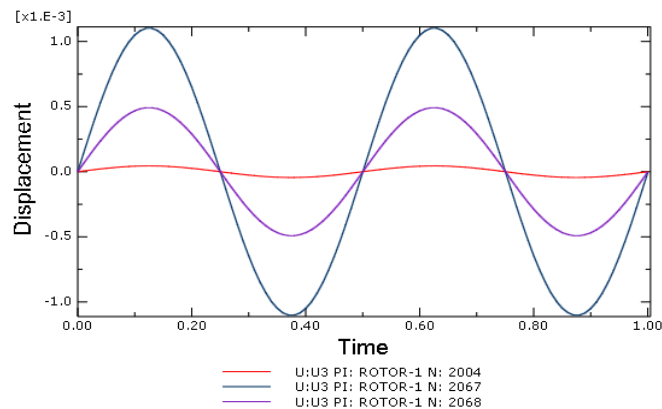
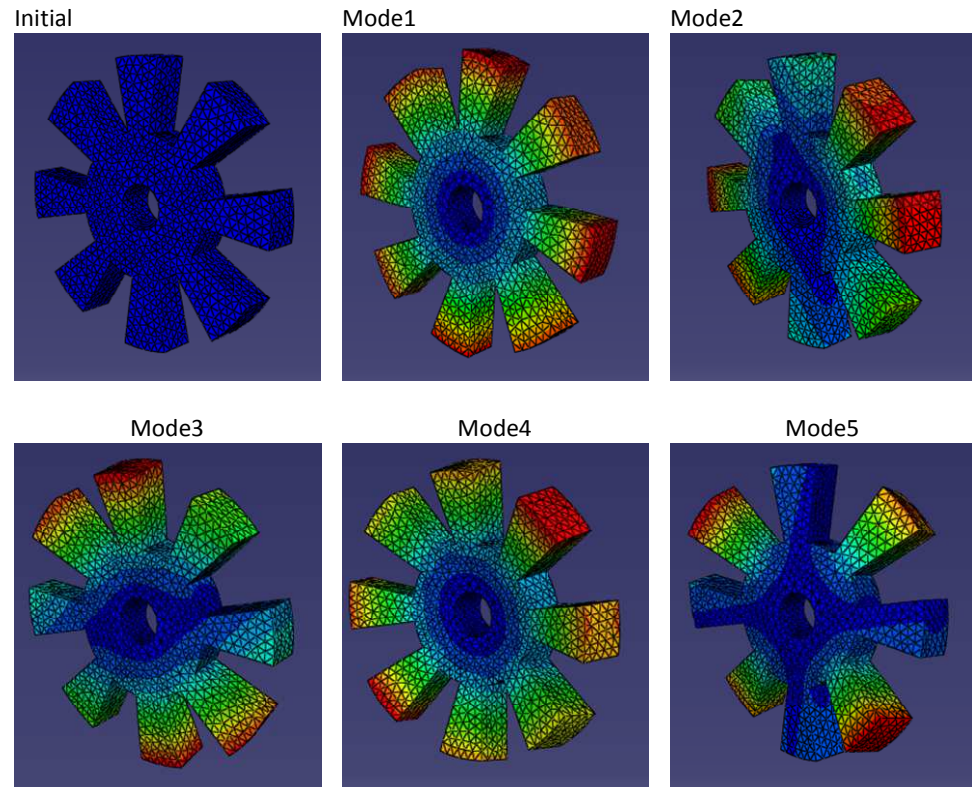


Obliczenia MES – wykład obieralny dla studentów WFiS

Ćwiczenie 4 – analiza dynamiczna (wyznaczanie częstotliwości drgań własnych)

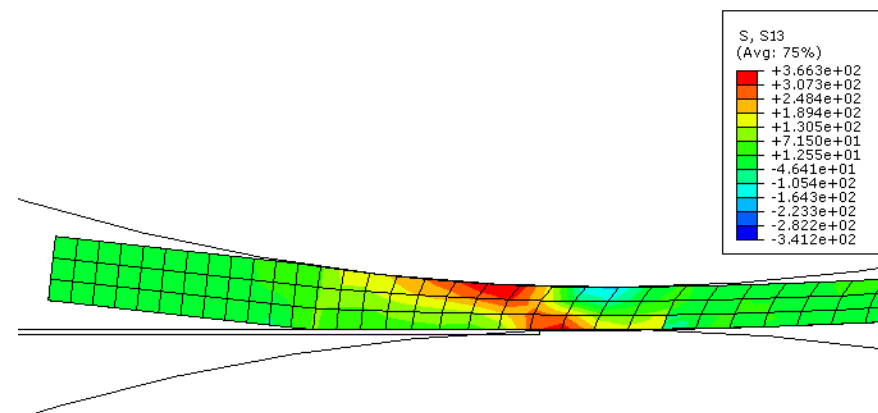
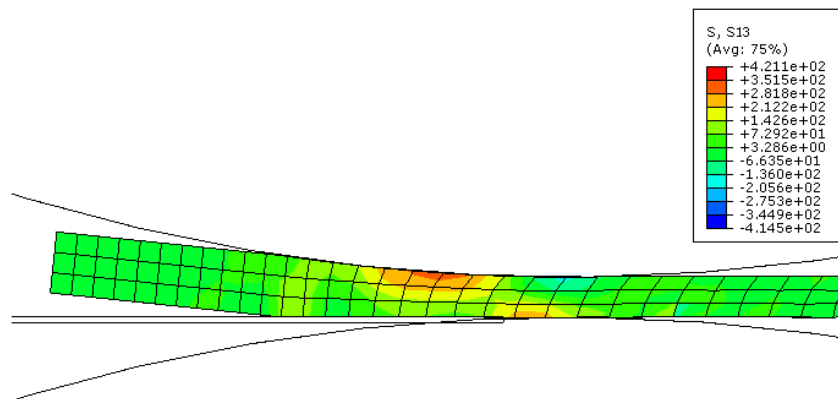
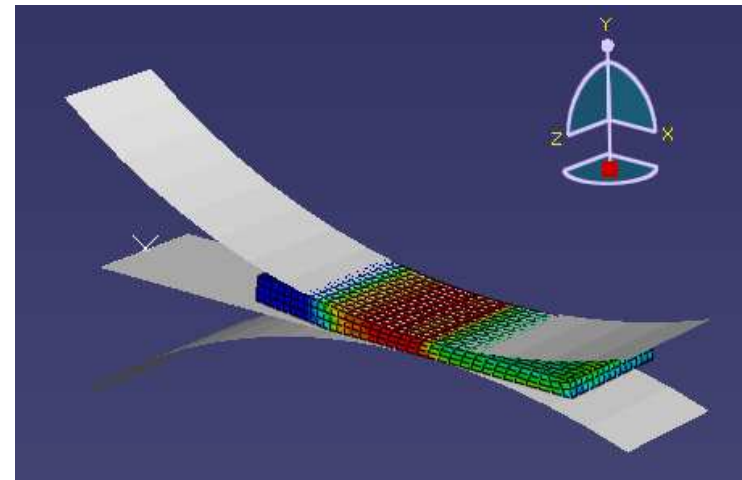
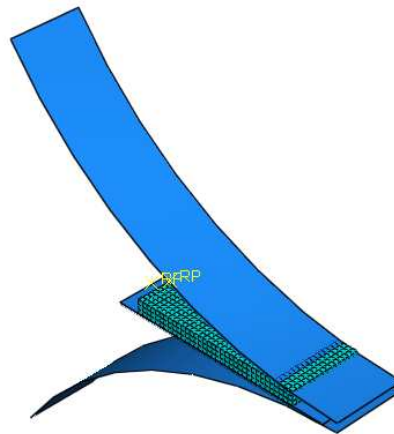
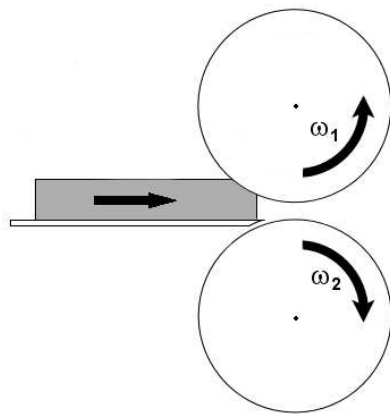


Mode	Natural Frequency [MHz]
1	9.407
2	9.557
3	9.568
4	10.027
5	10.033



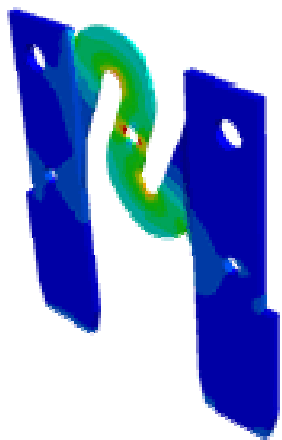
Obliczenia MES – wykład obieralny dla studentów WFiIS

Ćwiczenie 5 – analiza walcowania asymetrycznego 3D

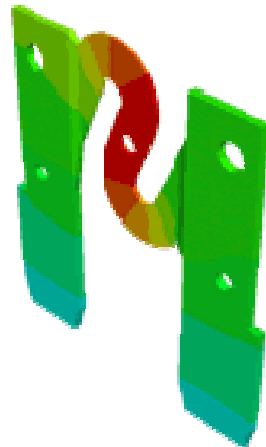


Obliczenia MES – wykład obieralny dla studentów WFiS

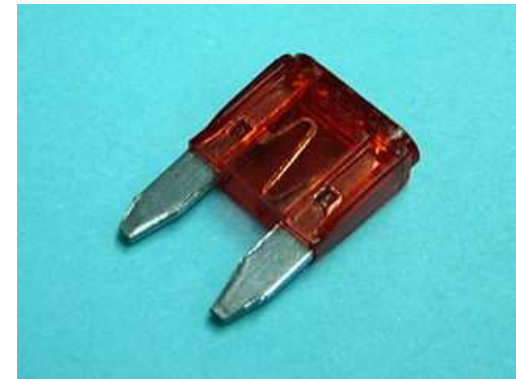
Ćwiczenie 6 – analiza wydzielania ciepła pod wpływem przepływu prądu



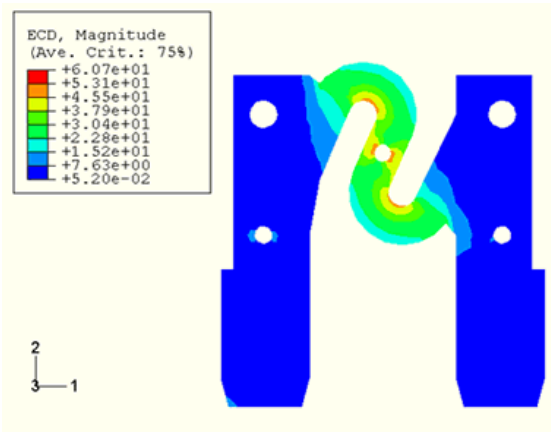
Rozkład gęstości prądu



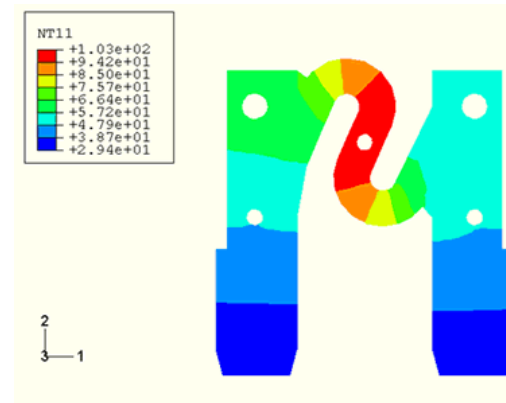
Rozkład temperatury



Bezpiecznik samochodowy



Rozkład gęstości prądu (A/mm^2)



Rozkład temperatury ($^{\circ}C$)