

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA  
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

AGH UNIVERSITY OF SCIENCE  
AND TECHNOLOGY

**AGH**

# **Inżynieria Chemiczna**

## **Transport masy i ciepła**

dr hab. inż. Agnieszka Gubernat, prof. AGH

[gubernat@agh.edu.pl](mailto:gubernat@agh.edu.pl)

p.1.14; budynek B8



**AGH**

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

**AGH UNIVERSITY OF SCIENCE  
AND TECHNOLOGY**

# **REOLOGIA - PODSTAWY**

# PLAN WYKŁADÓW

1. Wprowadzenie, podstawowe zasady , podstawowe zasady technologii chemicznej, schemat procesowy
2. Termodynamika procesów, energia, ciepło
3. Źródła energii, spalanie i właściwości paliw, niekonwencjonalne źródła energii
4. Temperatura, zerowa i trzecia zasada termodynamiki, entropia, termodynamiczna definicja temperatury,
5. Termometria, pomiary temperatury,
6. Suszenie i suszarnie,
7. Przepływ ciepła, mechanizmy wymiany ciepła, stałe materiałowe,
8. Płyny, statyka, dynamika, równanie ciągłości strugi, prawo Bernoulliego,
9. Reologia, modele reologiczne, zawiesiny i pasty,
10. Opory przepływu, filtracja, opadanie cząstek w płynach, sedymentacja,
11. Pomiary prędkości i natężenia przepływu,
12. Homogenizacja zawiesin, ocena jednorodności,
13. Segregacja hydrauliczna, odpylanie i oczyszczanie gazów,
14. Rozdrabnianie ciał stałych, klasyfikacja ziarnowa, metodyka pomiaru rozkładu i wielkości ziaren,

# REOLOGIA

Zjawiska odkształcenia i płynięcia materiałów jako przebiegi reologiczne opisuje się przez przedstawienie zależności pomiędzy działającymi naprężeniami i występującymi przy tym odkształceniami lub szybkością odkształceń.

Podstawowe właściwości reologiczne to:

- Sprężystość,
- Lepkość,
- Plastyczność,

# REOLOGIA

**Reologia** - to nauka o plastycznej deformacji (odkształceniach) oraz płynięciu materiałów. Termin reologia został zaproponowany przez E. Bingham, profesora Lafayette College (USA), w 1920 r., pod wpływem sugestii Markusa Reinera, zainspirowanej przez słynne stwierdzenie Heraklita "panta rhei", czyli "wszystko płynie".

**Reologia** wypełnia lukę, jaka istnieje pomiędzy teorią sprężystości ciał doskonale sprężystych i mechaniką płynów newtonowskich i zajmuje się zagadnieniami związanymi z odkształceniami i płynięciem rzeczywistych, spotykanych w praktyce materiałów - od stopów metali po rozrzedzone płyny - takie jak np. piana.

# MECHANIKA KLASYCZNA

## Teoria sprężystości

## Mechanika płynów

Materiały elastyczne

Materiały plastyczne

Płyn nienewtonowski

Płyn newtonowski

## REOLOGIA

Reologia zajmuje się takimi ciałami jednorodnymi lub niejednorodnymi jak: pasty, breje, szlamy, pulpy, emulsje, zawiesiny ziarniste i włókniste, mieszanka betonowa, młody beton i inne masy ceramiczne, kremy, farby, kleje, lakiery, żywice, smoły, kity, grunty ziemne, skały, nieskonsolidowane osady geologiczne, ciekłe kryształy, tworzywa sztuczne, roztwory polimerów, płyny fizjologiczne (jak krew), metale w podwyższonej temperaturze, piany, czy substancje sypkie o pewnych cechach płynów.

Jednym z najważniejszych zagadnień w reologii jest empiryczne ustalanie zależności między naprężeniem mechanicznym i wywołanym przez to naprężenie odkształceniem. Techniki umożliwiające tego rodzaju pomiary są ogólnie nazywane reometrią.

Zależność pomiędzy naprężeniem mechanicznym i wywołanym przez to naprężenie odkształceniem w formie wykresu nazywamy **KRZYWĄ PŁYNIĘCIA**.

Do opisu ciał rzeczywistych służą modele ciał doskonałych:

- Ciało doskonale sprężyste Hooke'a,
- Ciało doskonale lepkie Newtona,
- Ciało doskonale plastyczne Saint-Venanta,



Nazwa ciała	Zależność funkcyjna	Wykres	Nazwa ciała
doskonale sprężyste Hooke'a	naprężenia normalne $\sigma = E \cdot \varepsilon$ naprężenia styczne $\tau = G \cdot \gamma$		<p>sprężyna</p>
doskonale lepkie Newtona	$\tau = \eta \frac{du}{dx} = \eta D$ D - szybkość odkształcenia,		<p>cylinder napętniony olejem</p>
doskonale plastyczne Saint-Venanta	$\tau = \tau_y$ τ - naprężenie płynięcia lub wartość graniczna		<p>suwak</p>

# LEPKOŚĆ CIECZY NEWTONOWSKICH

$$dT = \eta \frac{du}{dx} \cdot dA / : dA \Rightarrow \tau = \eta \frac{du}{dx} = \eta \cdot \gamma$$

gdzie:

$T$  - siła tnąca,

$A$  - powierzchnia poddawana ścinaniu,

$u$  - prędkość przesuwu dwóch warstewek cieczy względem siebie,

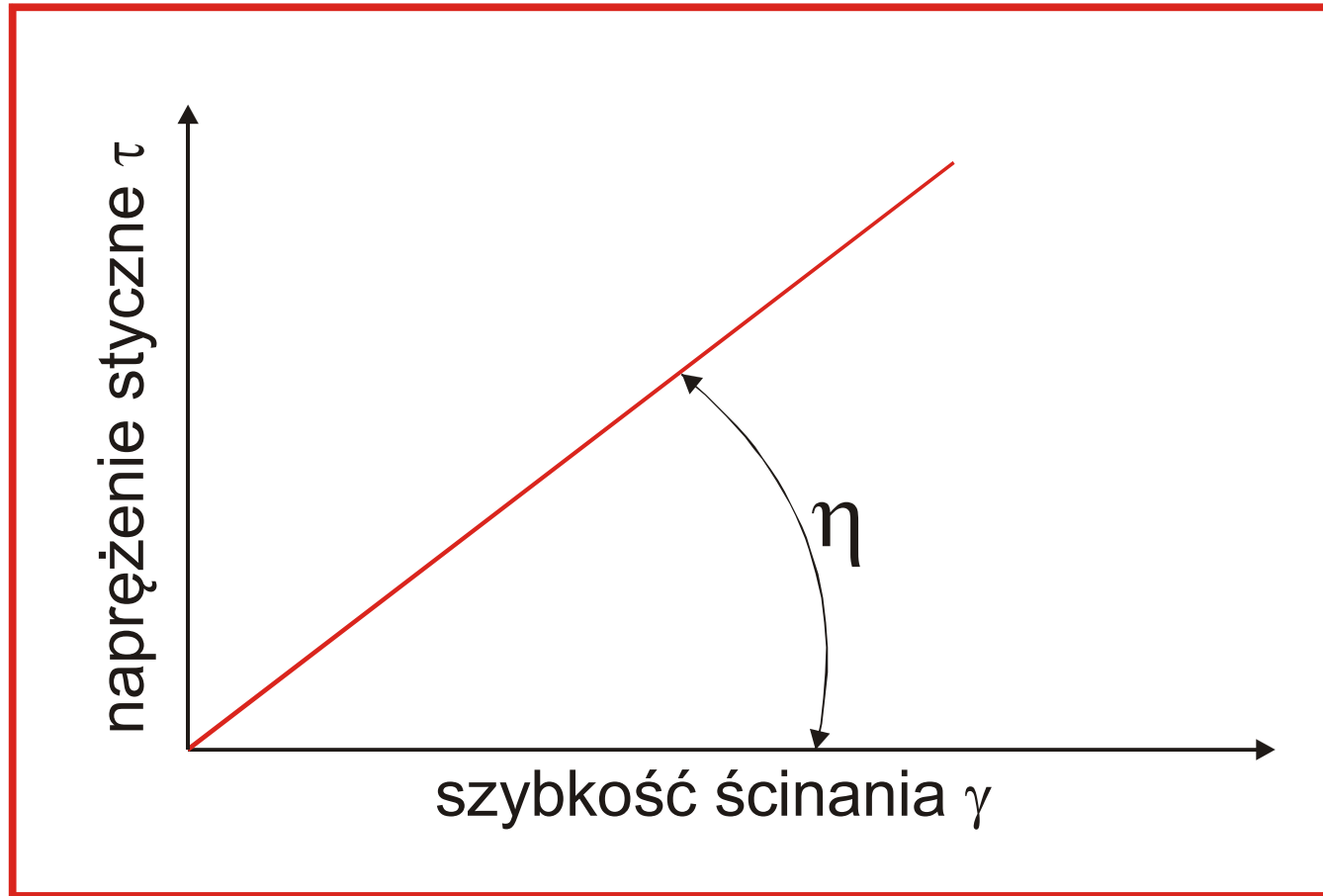
$x$  - odległość między warstewkami cieczy,

$\tau$  - naprężenie styczne,

$\gamma$  - szybkość ścinania,

**Lepkość newtonowska  $\eta$**  jest funkcją tylko temperatury i ciśnienia. Jest ona całkowicie niezależna od szybkości ścinania. Tak więc krzywa płynięcia cieczy newtonowskiej, która jest zależnością naprężenia stycznego  $\tau$  i szybkości ścinania jest linią prostą o nachyleniu  $\text{tg}\eta$ . W ten sposób ciecz newtonowską można wyczerpująco scharakteryzować przez jedną stałą  $\eta$ .





**CIECZE NEWTONOWSKIE to:  
WODA, OLEJE MINERALNE, BITUMY i MELASY**

# CIECZE NIENEWTONOWSKIE



AGH

Lepkość (pozorna)  $\eta_a$  cieczy nienewtonowskich zależy m.in. od szybkości ścinania, kształtu naczynia, rodzaju procesu jakim uprzednio poddawano ciecz. Ciecze nienewtonowskie dzieli się na trzy podstawowe grupy:

**I. CIECZE DLA, KTÓRYCH W DOWOLNYM PUNKCIE SZYBKOŚĆ ŚCINANIA JEST FUNKCJĄ TYLKO NAPRĘŻENIA STYCZNEGO PANUJĄCEGO W TYM PUNKCIE**

$$\gamma = f(\tau)$$

**Ia. Ciało binghamowskie (plastyczne)**

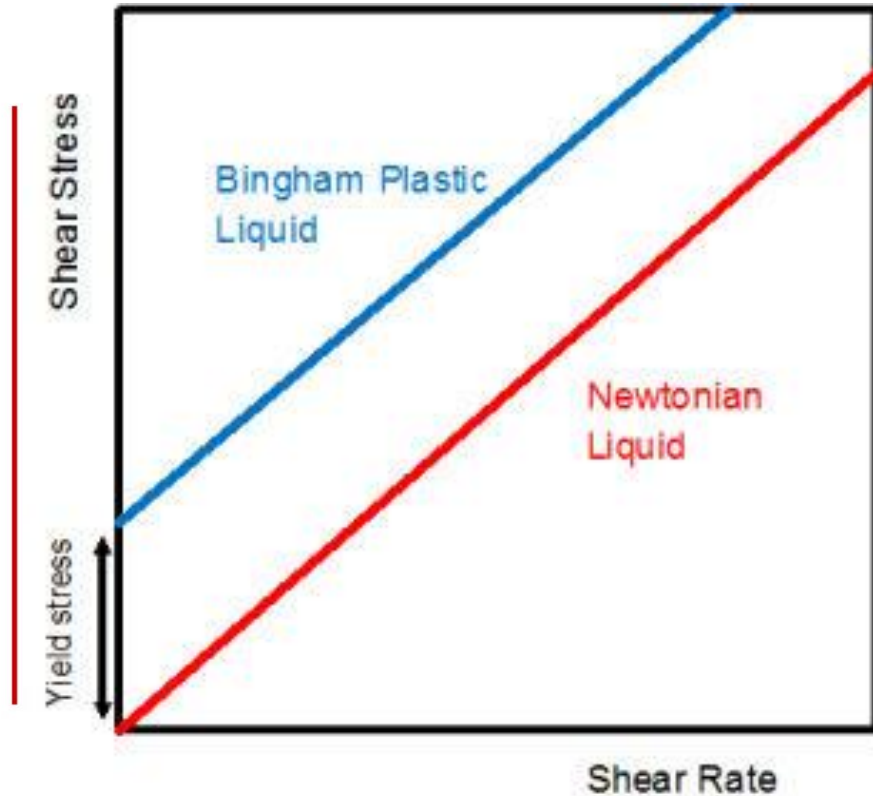
$$\tau - \tau_a = \eta_p \cdot \gamma$$

gdzie:

$\eta_p$  - lepkość plastyczna lub współczynnik sztywności,

Uważa się, że w stanie spoczynku ciała binghamowskie posiadają strukturę trójwymiarową, której sprężystość jest dostatecznie duża, aby oprzeć się każdemu naprężeniu stycznemu mniejszemu od granicy płynięcia. Jeśli zostanie przekroczona granica płynięcia, struktura ulega zniszczeniu i ciecz przybiera cechy cieczy newtonowskiej.

## Ia. Ciało binghamowskie (plastyczne)



### CIAŁA BINGHAMOWSKIE:

zawiesiny, szlamy, farby olejne, pasta do zębów, pomadki do ust itd.

## Ib. Ciecze pseudoplastyczne

Stosunek naprężenia stycznego do szybkości ścinania (tzw. lepkość pozorna  $\eta_a$ ) maleje w miarę wzrostu szybkości ścinania. Krzywa płynięcia jest więc linią prostą dopiero przy bardzo dużych prędkościach. Ta graniczna wartość nachylenia krzywej płynięcia nazywana jest lepkością przy ścinaniu nieskończonym. Empiryczną zależność naprężenia stycznego od szybkości ścinania przedstawia prawo wykładnicze:

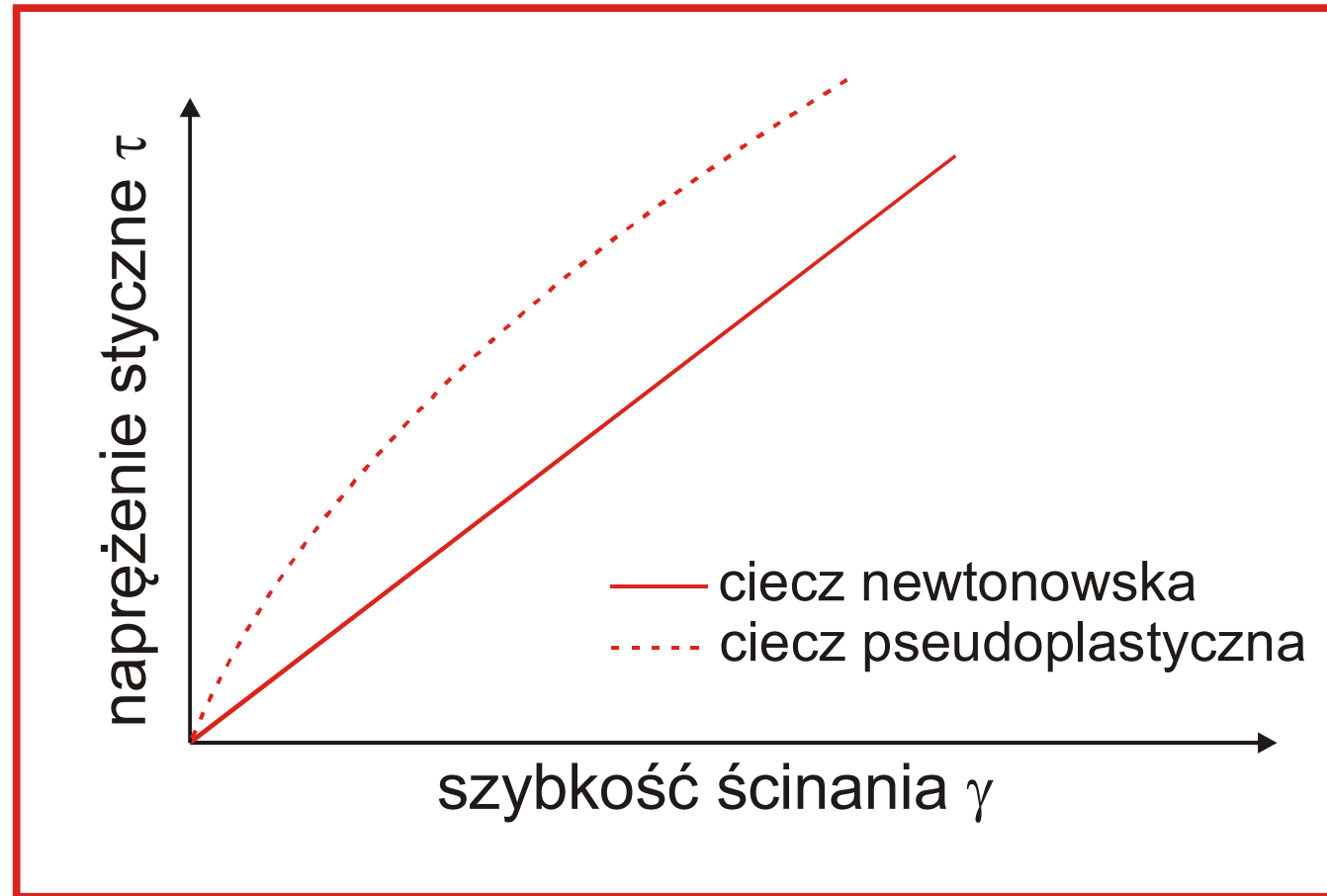
$$\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n$$

$$\text{lepkość pozorna wynosi: } \eta_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

zatem

$$\eta_a = k \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$$

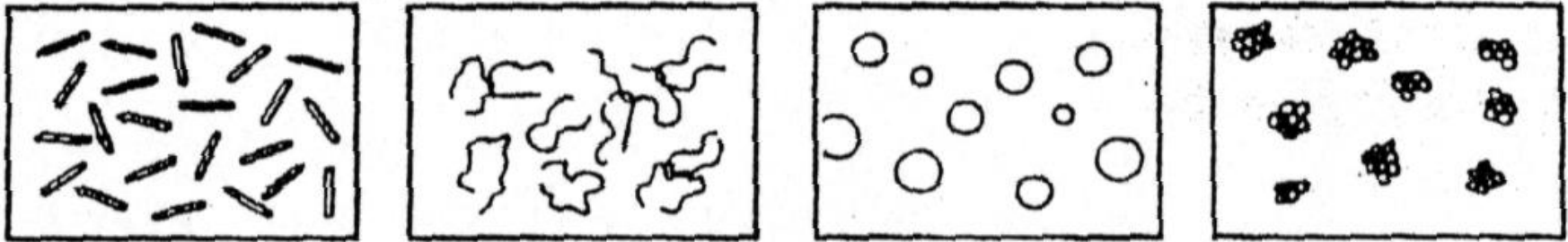
Ponieważ dla cieczy pseudoplastycznych  $n < 1$ , lepkość pozorna maleje w miarę wzrostu szybkości ścinania.



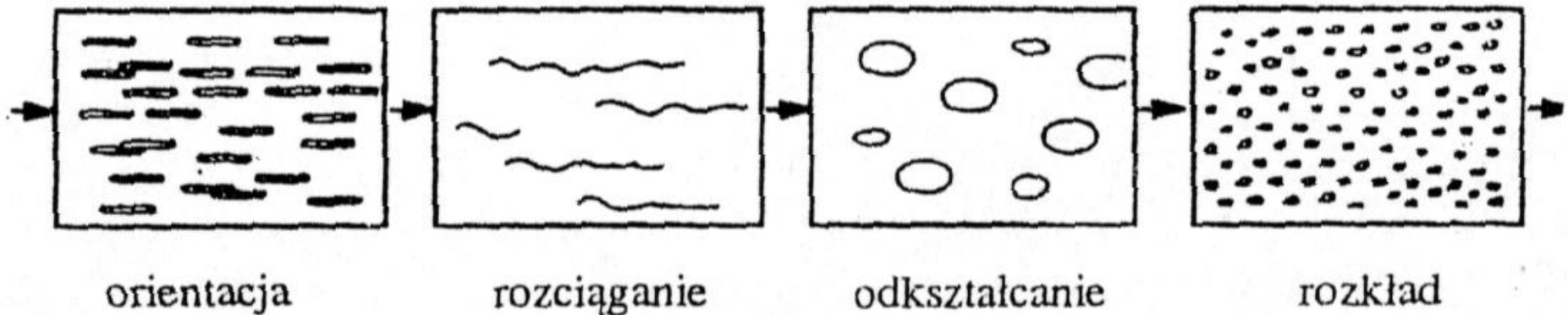
**CIECZE PSEUDOPLASTYCZNE:**  
zawiesiny cząstek niesymetrycznych  
lub roztwory polimerów

W miarę wzrostu szybkości ścinania asymetryczne cząstki podlegają stopniowemu uporządkowaniu czyli dłuższe cząsteczki układają się wzdłuż osi płynięcia. Lepkość pozorna spada do momentu gdy ściślejsze ułożenie cząstek wzdłuż linii przepływu stanie się niemożliwe, krzywa płynięcia przechodzi wówczas w linię prostą.

1. Ciecze w spoczynku



2. Ciecze płynące w kierunku pokazanym przez strzałki





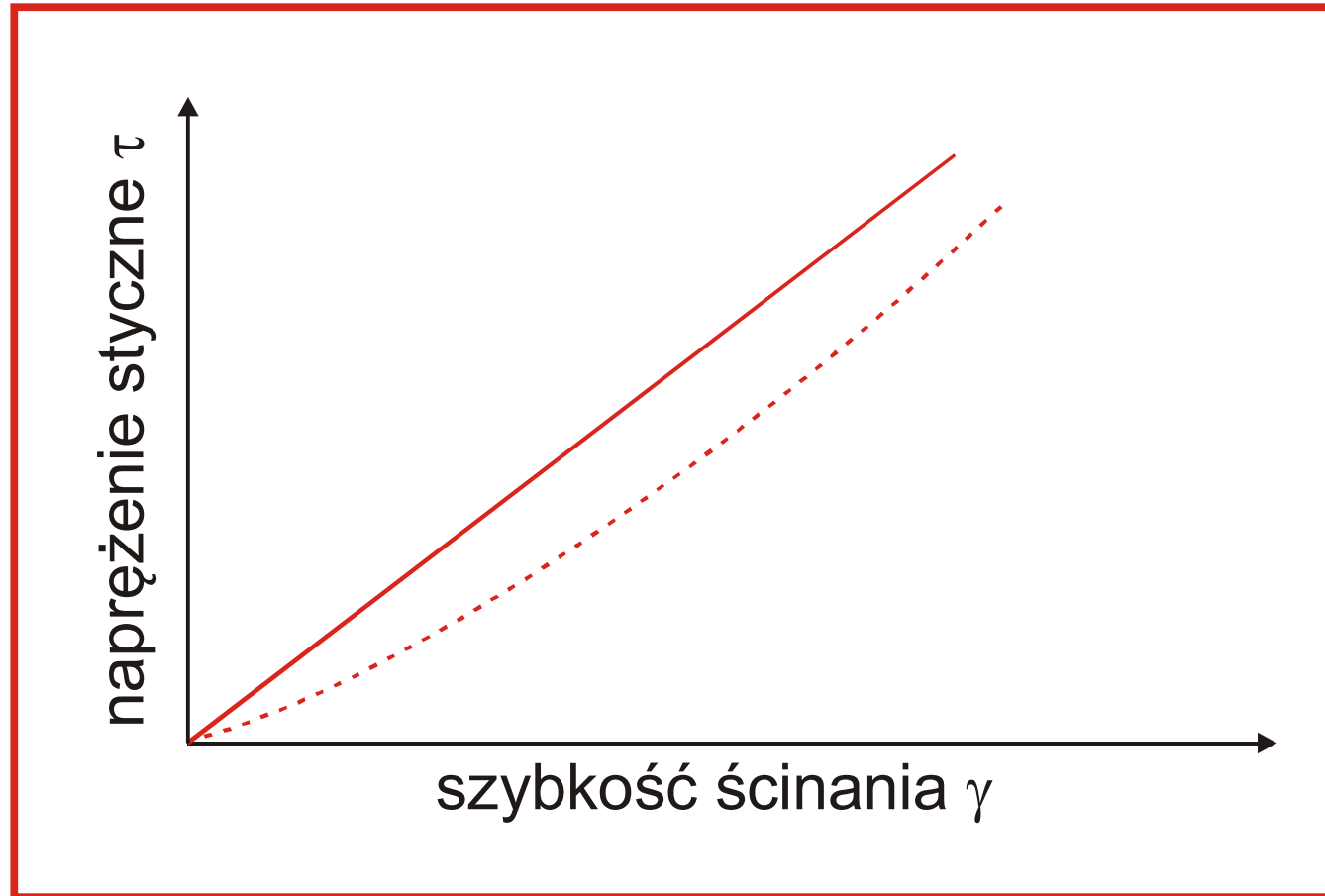
AGH

## Ic. Ciecze przejawiające dylatancję

W tym przypadku lepkość pozorna rośnie w miarę wzrostu szybkości ścinania. Ciecze te spełniają prawo potęgowe przy czym dla w/w cieczy  $n > 1$ .

$$\eta_a = k \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$$

Podczas ścinania zawiesiny w zakresie małych szybkości ścinania nośnik spełnia rolę smaru czyli zmniejsza lepkość zatem naprężenia styczne są stosunkowo niewielkie. Ciasne upakowanie cząstek ulega zniszczeniu w miarę wzrostu szybkości ścinania. Powoduje to pewne rozszerzenie (dylatancję) zawiesiny. Nośnik nie jest już w stanie spełniać rolę smaru, a więc naprężenie niezbędne dla utrzymania przepływu poważnie wzrasta co powoduje wzrost lepkości pozornej ze wzrostem szybkości ścinania.



## CIECZE PRZEJAWIAJĄCE DYLATANCJĘ:

stężone zawiesiny, zol PCW

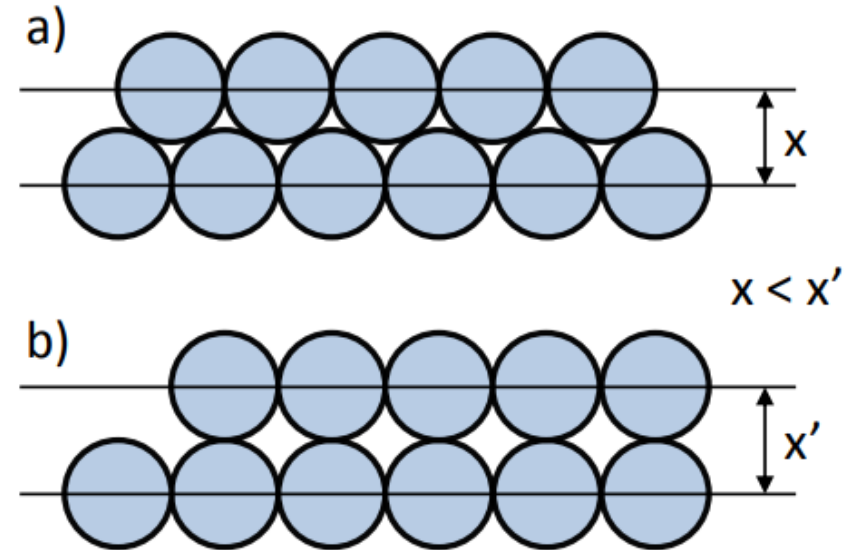
Zawiesiny: nanokrzemionki w glikolu etylenowym; mąki kukurydzianej czy SiC w wodzie



# Mechanizmy zagęszczania ścinaniem

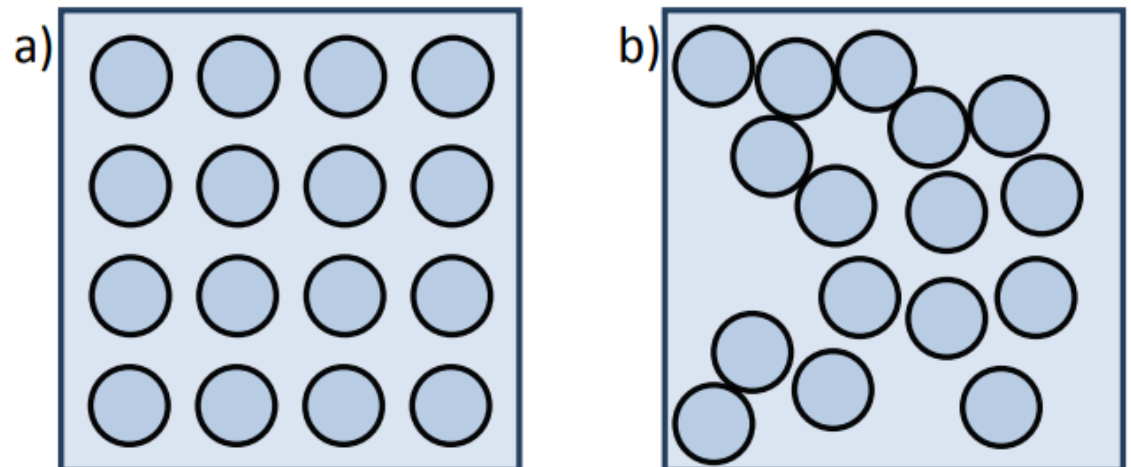
Schemat teorii Reynolds'a:

- a) stan spoczynku
- b) proste ścinanie

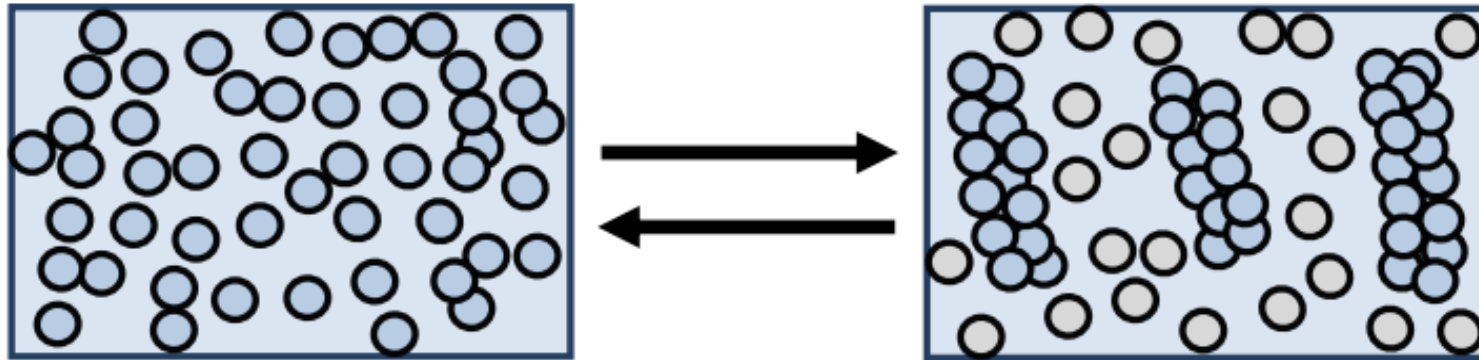


Teoria Order – Disorder Transition:

- a) stan układu poniżej krytycznej szybkości ścinania,
- b) stan układu powyżej krytycznej szybkości ścinania.

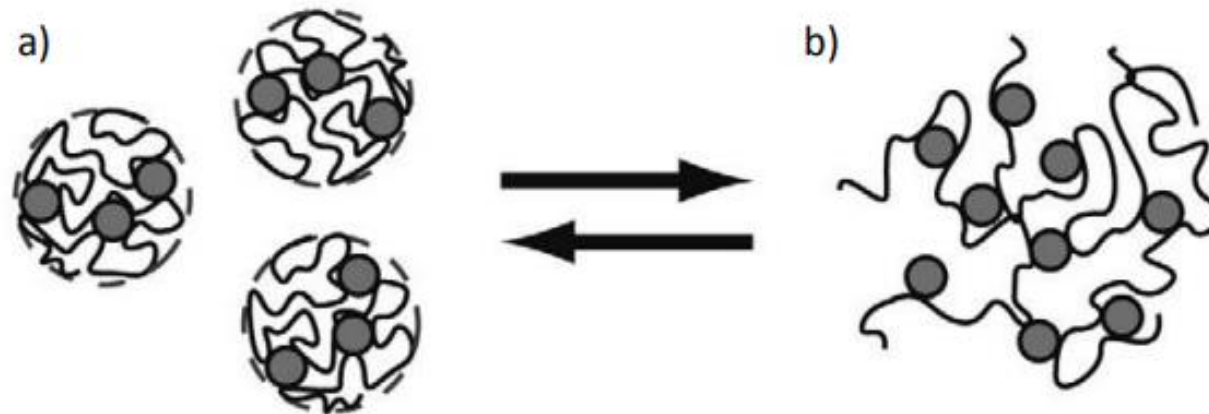


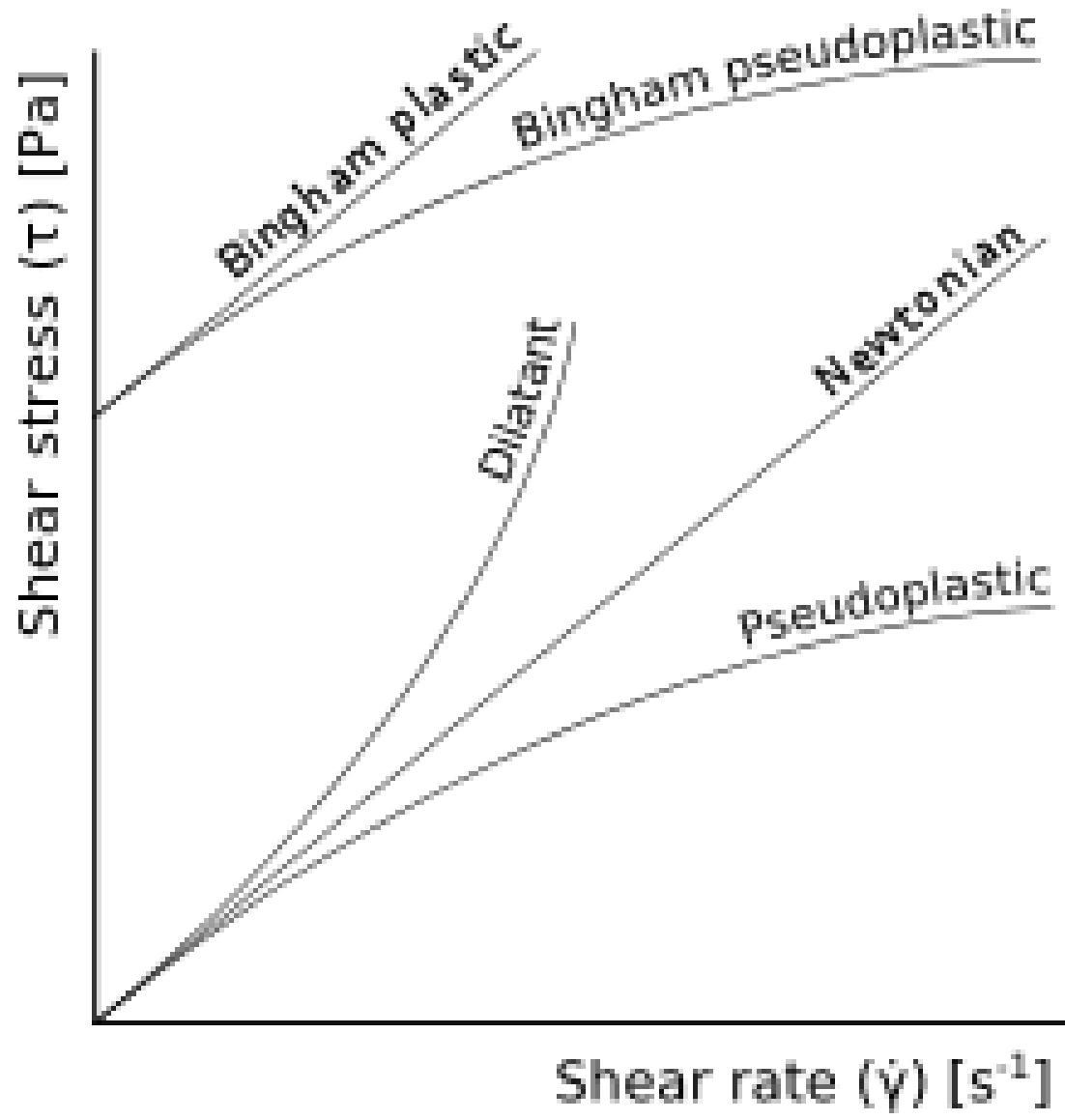
## Teoria tworzenia się hydroklasterów



## Teoria flokulacji:

- a) – układ w stanie spoczynku,
- b) – układ jako trójwymiarowa sieć







AGH

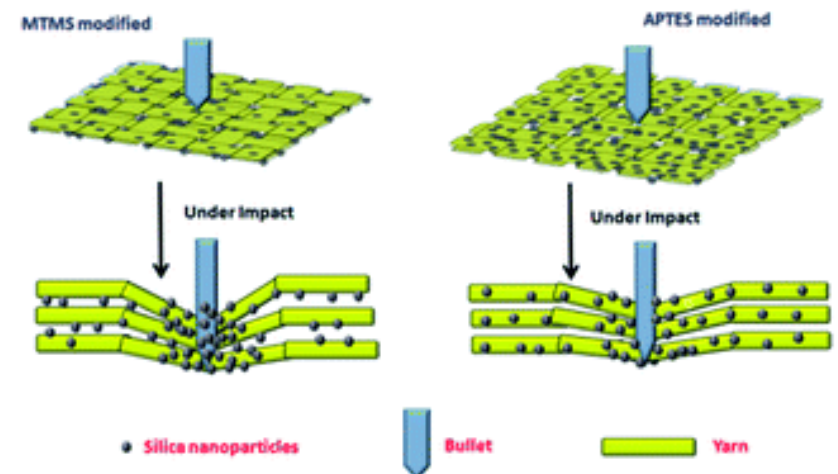
# CIECZE DYLATANCYJNE

Obecnie stosowane **ciecze dylatancyjne** to przede wszystkim zawiesiny **nanocząstek krzemionki w glikolu etylenowym (EG) lub glikolu polietylenowym (PEG)**. Prowadzi się też badania nad zawiesinami wykonanymi z proszków o koloidalnych rozmiarach cząstek:  $\text{TiO}_2$ , węglanu wapnia, mąki kukurydzianej a także SiC.

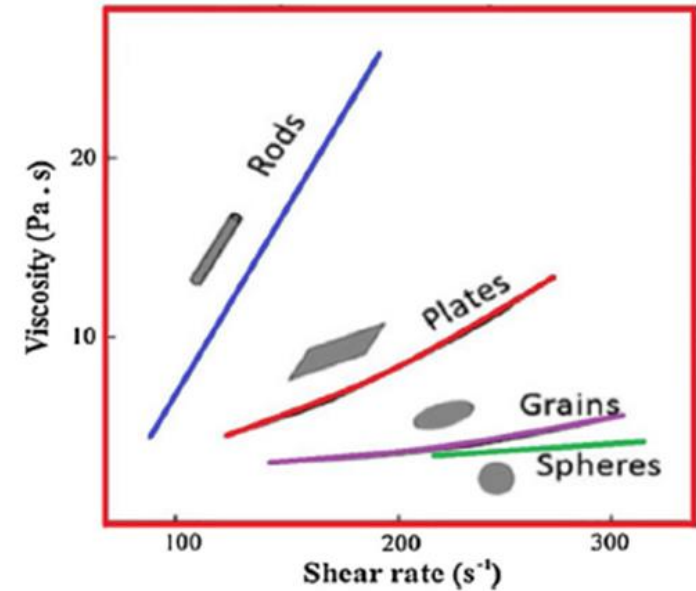
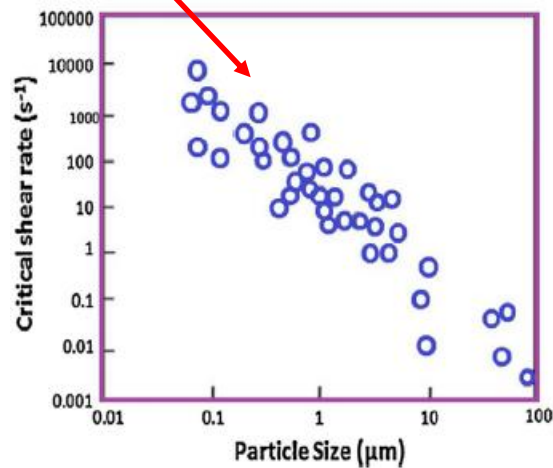
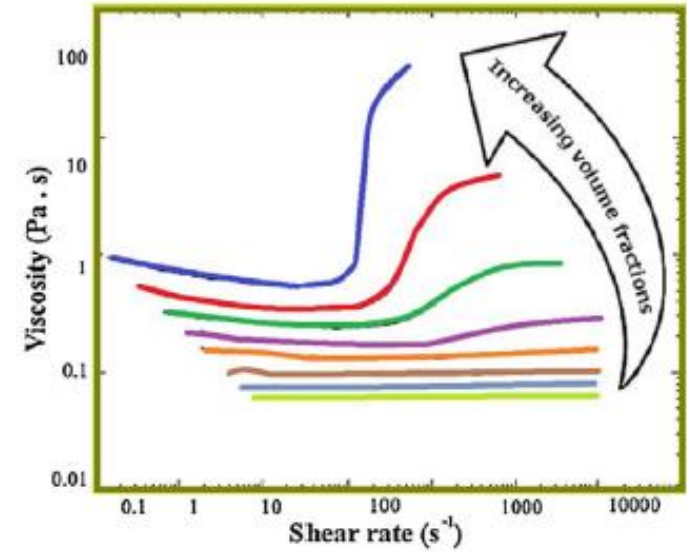
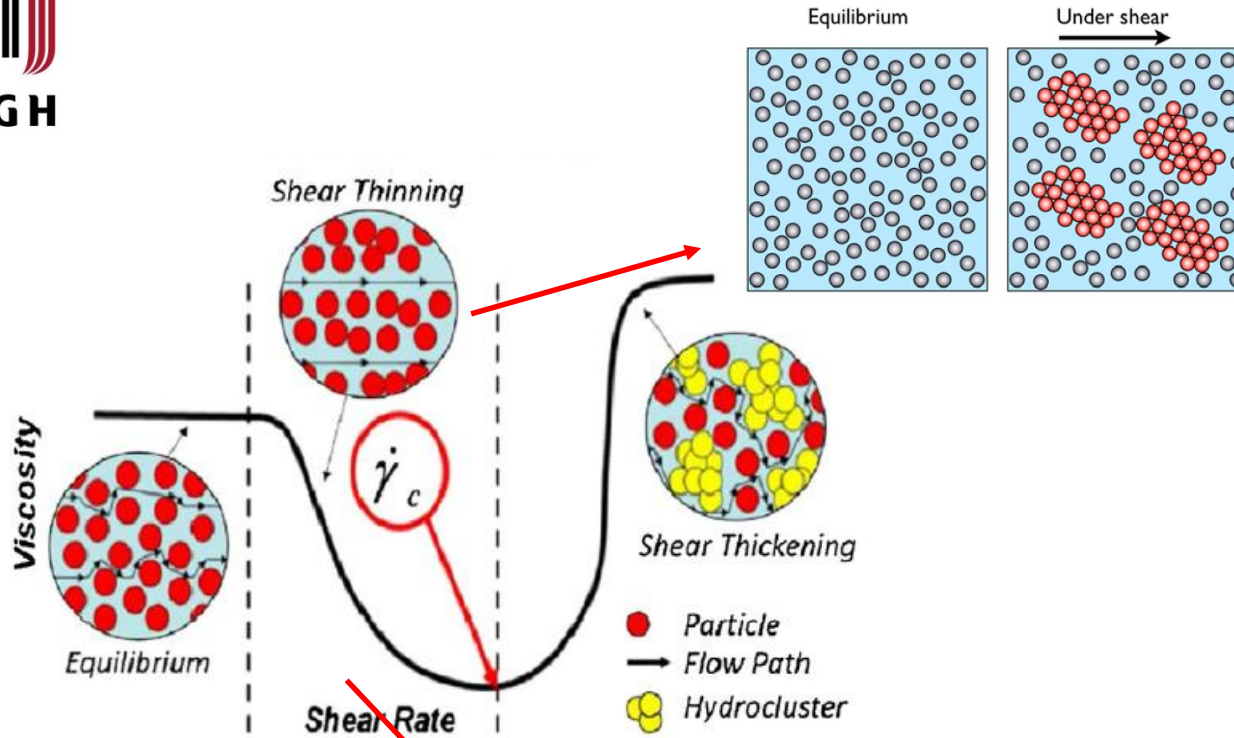
Główne zastosowania to:

- **balistyka** (kamizelki kuloodporne, hełmy),
- **sport** (nałokietniki, nakolanniki, kaski).
- **urządzenia do tłumienia** np. drgań amortyzatory,

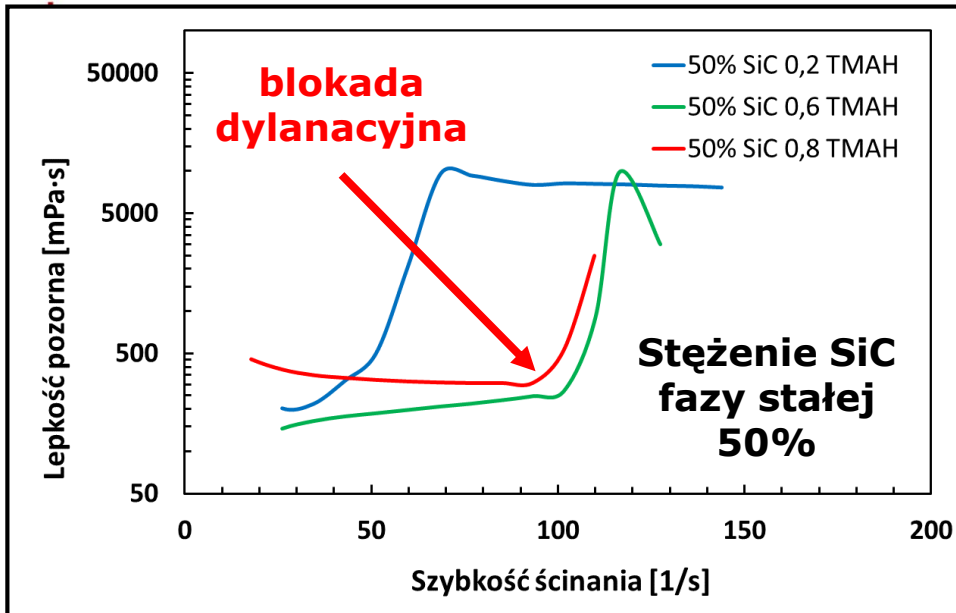
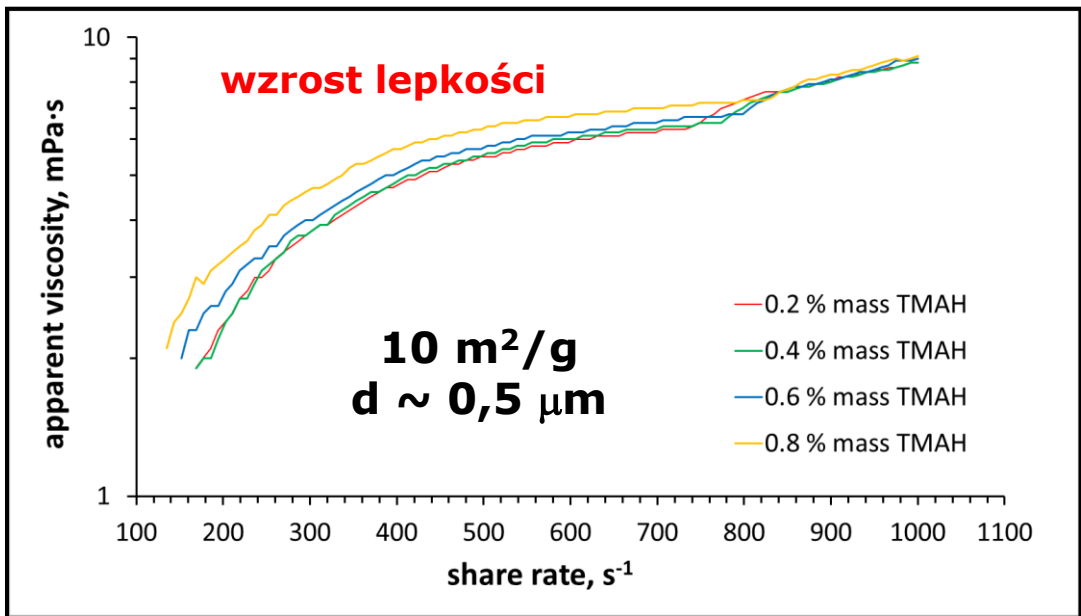
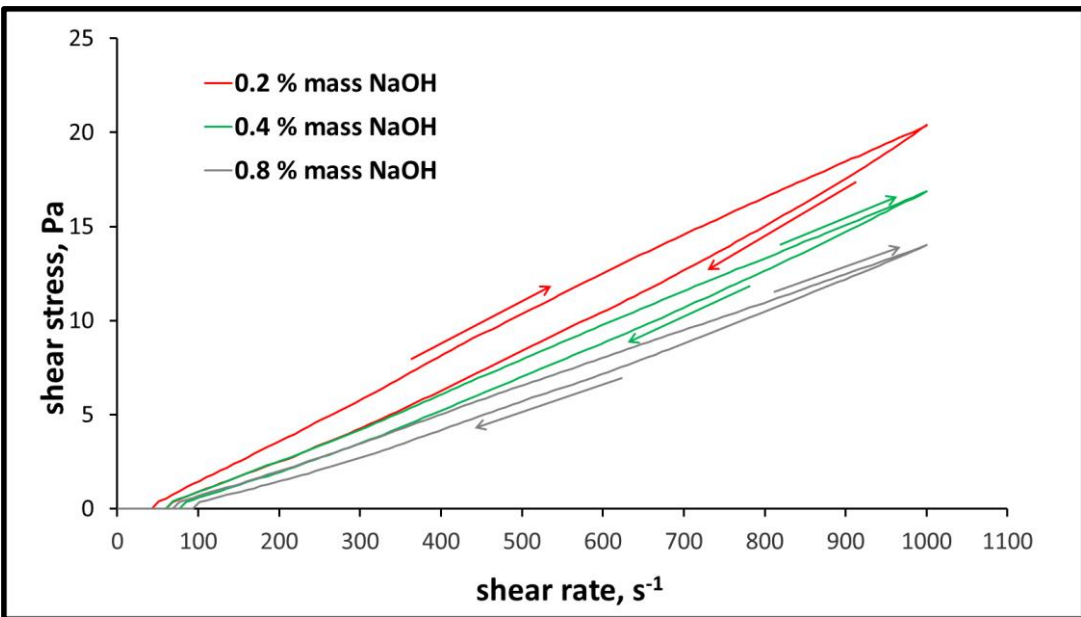
Technologia produkcji polega na wypełnianiu cieczą dylatancyjną odpowiednich pojemników lub nasycaniu taką cieczą mat czy tkanin wykonanych np. z Kevlaru.



# CIECZE DYLATANCYJNE (STF)



# ZAWIESINY SiC CIECZE DYLATANCYJNE

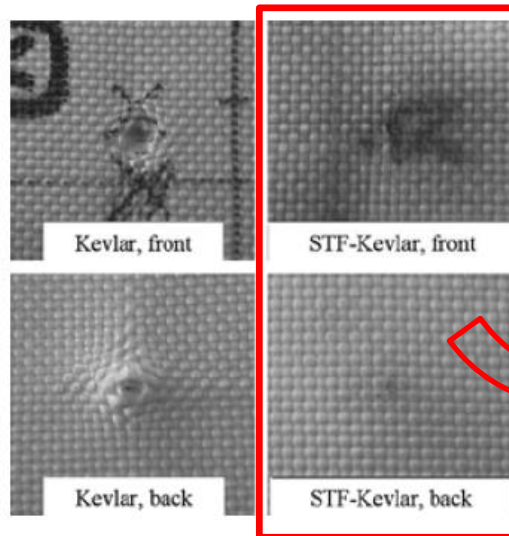


**Ciecze dylatancyjne (zagęszczane ścinaniem)** inaczej mówiąc można wytworzyć z drobnoziarnistych proszków SiC. Ciecze takie stają się sztywne (twarde) pod wpływem impulsu, uderzenia. W zawiesinach o znacznym udziale fazy stałej może pojawić się **tzw. blokada dylatancyjna**.

# CIECZE DYLATANCYJNE - ZASTOSOWANIE



 **POLYANSWER**



## II. CIECZE NIENEWTONOWSKIE, KTÓRYCH WŁASNOŚCI REOLOGICZNE ZMIENIAJĄ SIĘ W CZASIE

### Ila. Ciecze tiksotropowe - rozpad struktury przy ścinaniu

Stosujemy stałą szybkość ścinania. Jeśli poddać ścinaniu ciecz tiksotropową, będącą dłuższy czas w spoczynku jej lepkość pozorna będzie się zmniejszać w miarę upływu czasu ścinania. Dzieje się tak na skutek stopniowego niszczenia struktury. Szybkość rozpadania się struktury zależy będzie od ilości wiązań, które mogą ulec zniszczeniu. Będzie więc maleć w miarę upływu czasu.

Szybkość odbudowy struktury będzie rosła z czasem, w miarę jak rośnie potencjalna ilość wiązań. W końcu zostanie osiągnięty stan równowagi dynamicznej. Ten stan równowagi uzależniony jest od szybkości ścinania i przesuwa się w kierunku większego rozpadu struktury a zatem w kierunku wzrostu szybkości ścinania.



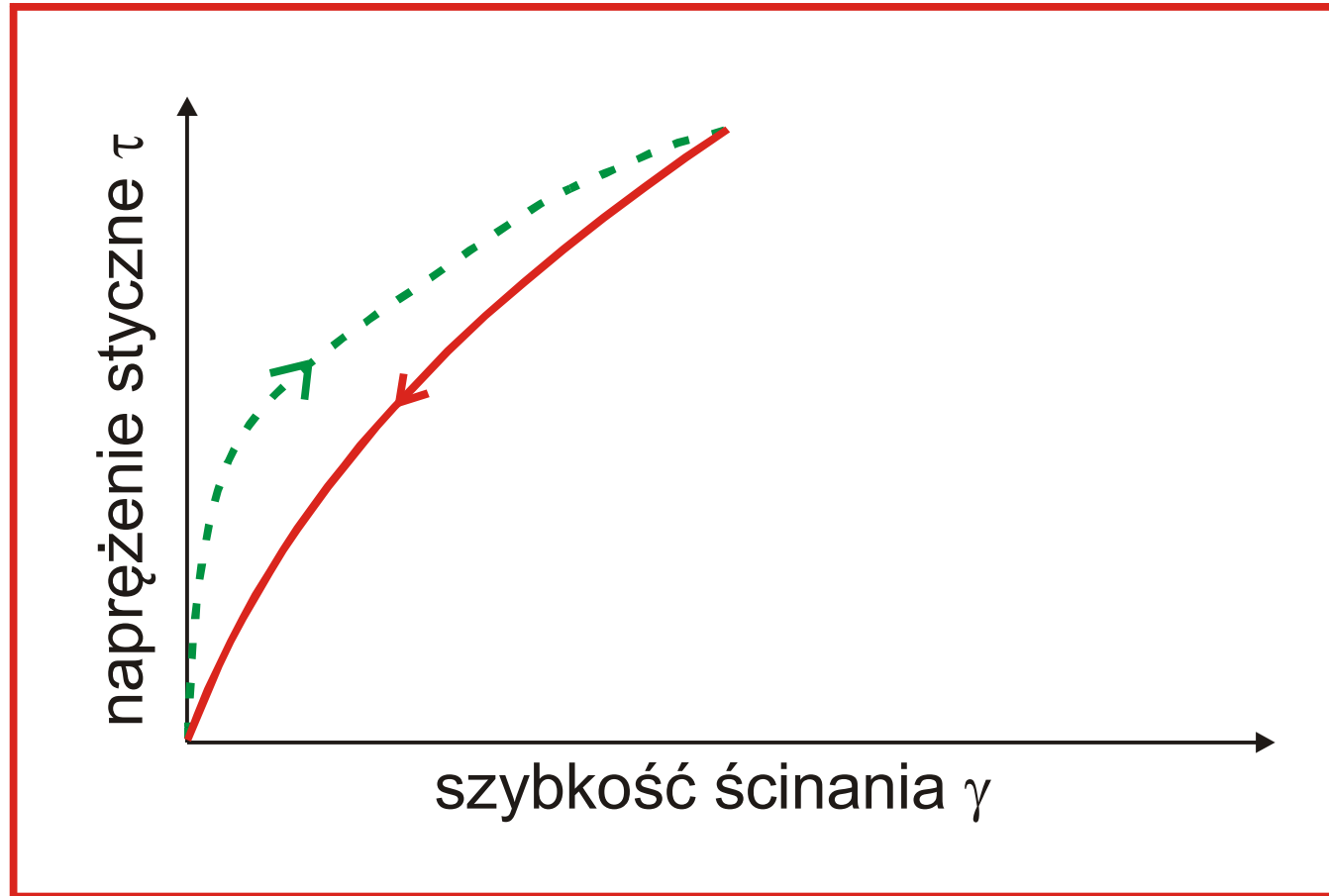
## II. CIECZE NIENEWTONOWSKIE, KTÓRYCH WŁASNOŚCI REOLOGICZNE ZMIENIAJĄ SIĘ W CZASIE

### Ila. Ciecze tiksotropowe - rozpad struktury przy ścinaniu

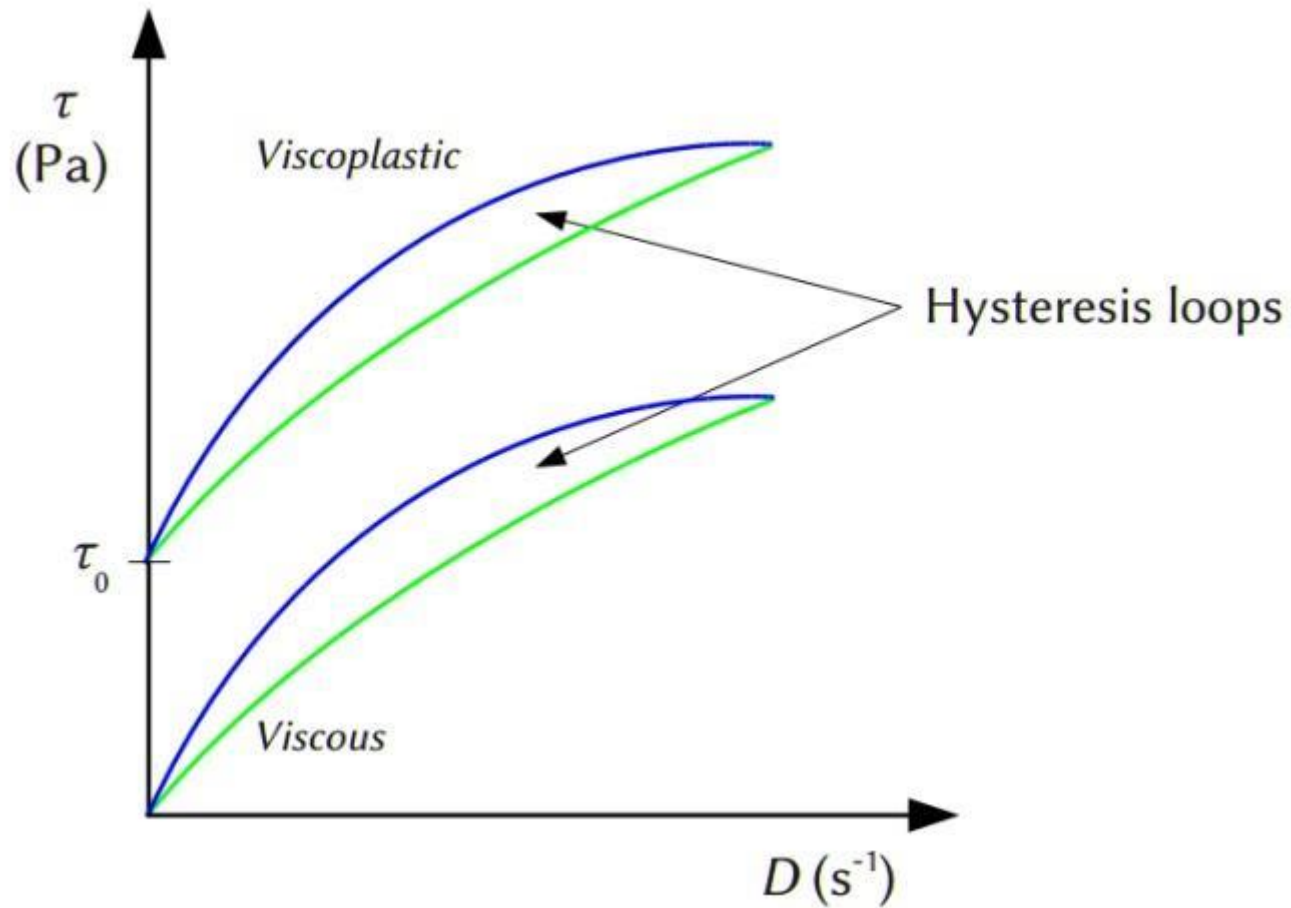
Tiksotropia jest procesem odwracalnym i w bezruchu struktura cieczy stopniowo odbudowuje się.

Krzywe szybkości ścinania cieczy tiksotropowej sporządzone wpierw dla rosnącej a potem dla malejącej szybkości ścinania wykazują pętlę histerezy.

Pole powierzchni określa wartość wielkości zwanej tiksotropią. Powierzchnia ta ma wymiar „energii” dostarczonej do ścinanej objętości próbki, co oznacza, że do zniszczenia struktury tiksotropowej wymagana jest energia.



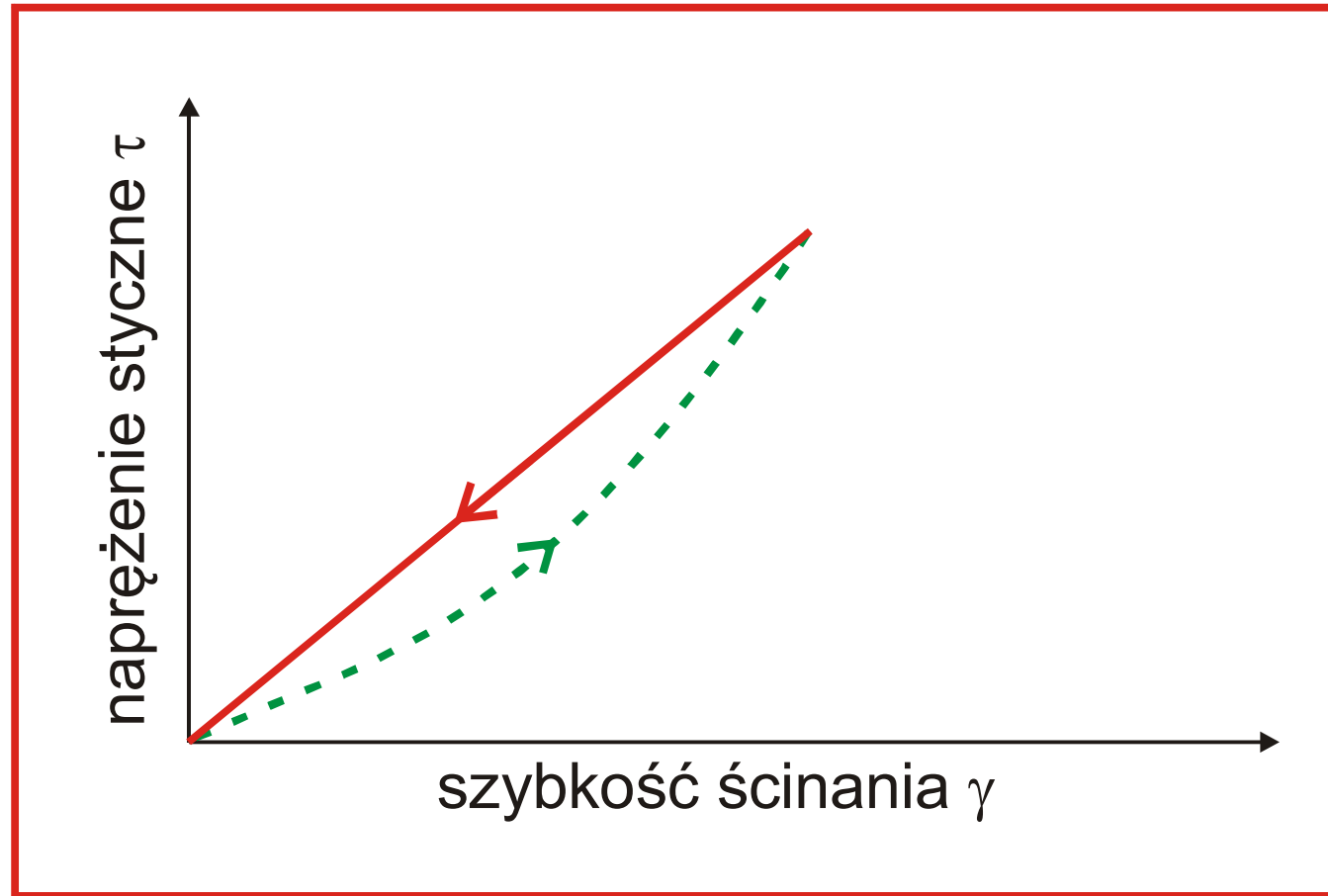
**ZJAWISKO TIKSOTROPII:**  
przejście żel  $\leftrightarrow$  żol (leki),  
malowanie pędzlem pionowych ścian



**ZJAWISKO TIKSOTROPII:**  
przejście żel  $\leftrightarrow$  zół (leki),  
malowanie pędzlem pionowych ścian

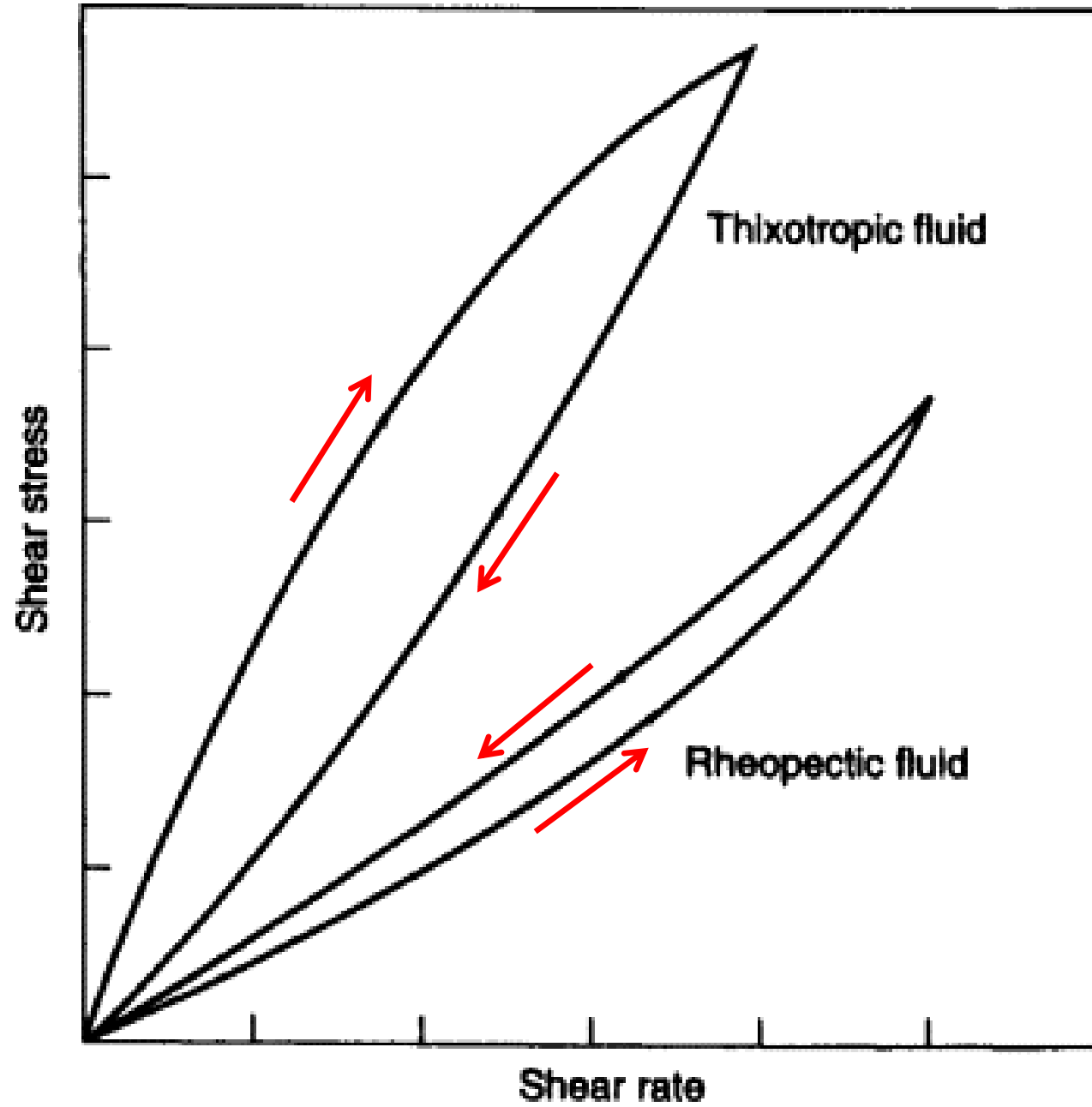
## IIb. Ciecze wykazujące reopeksję - tworzenie struktury przy ścinaniu (antytikсотropia)

W tym przypadku przy ścinaniu typowe dla tych cieczy jest formowanie się struktury. Np. dla gipsu po gwałtownym wstrząsaniu czas zestalania wyniósł 40min., natomiast po łagodnym obracaniu naczynia z zawiesiną 20sek.. Wskazuje to na fakt, że niezbyt gwałtowne ścinanie ułatwia powstawanie struktury podczas gdy gwałtowne ścinanie (wstrząsanie) niszczy ją. Po przekroczeniu pewnej krytycznej wartości ścinania odbudowa struktury jest niemożliwa, struktura wówczas ulega zniszczeniu.

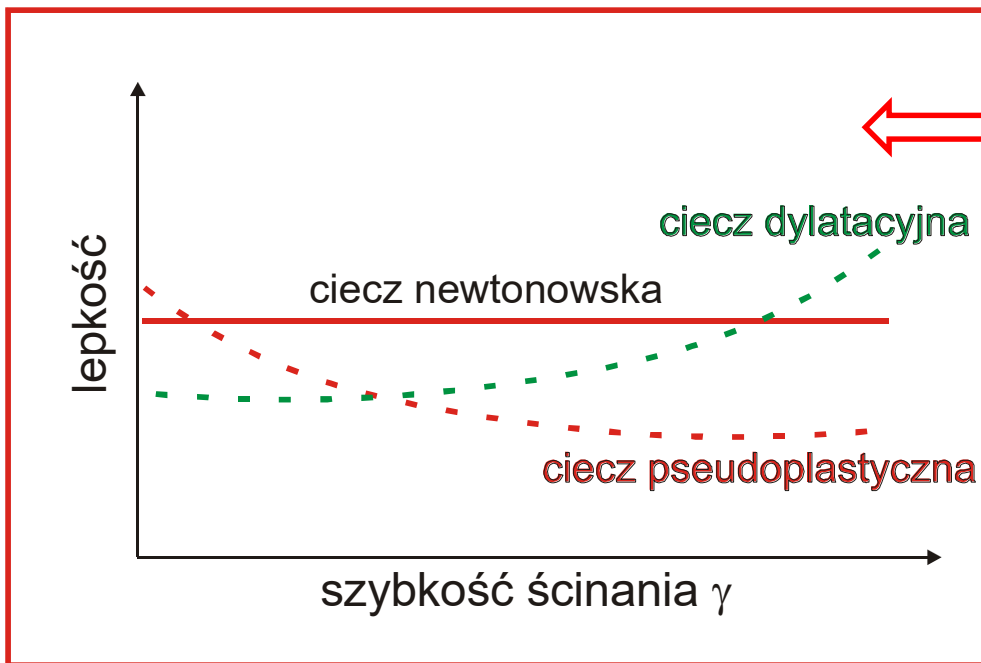


## ZJAWISKO REOPEKSJI:

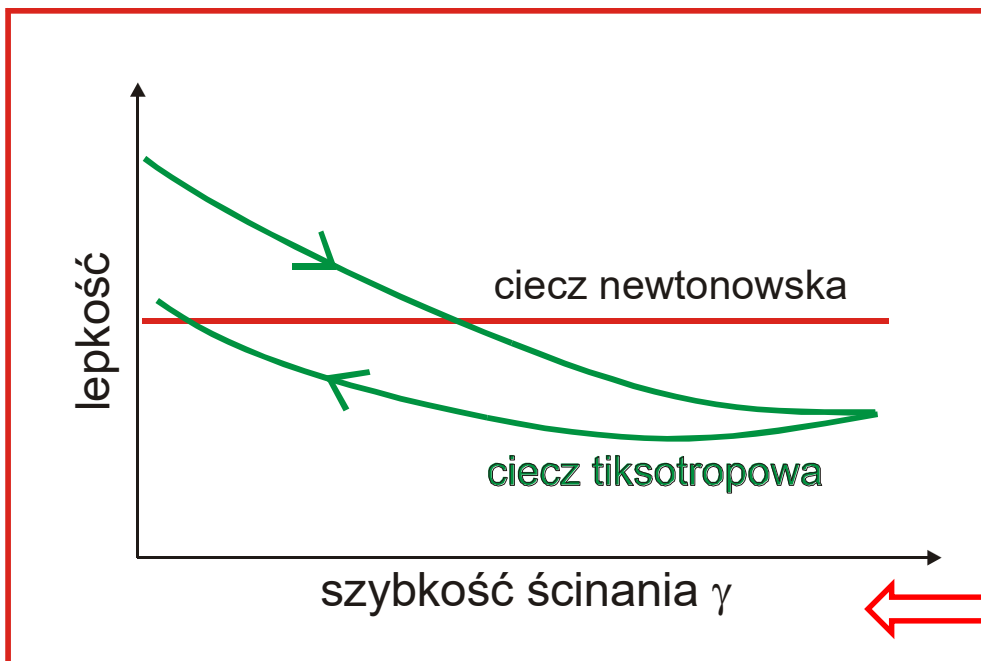
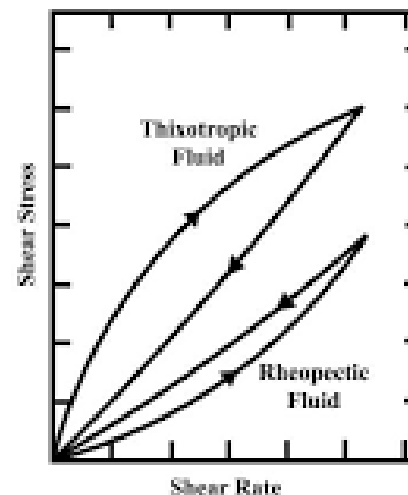
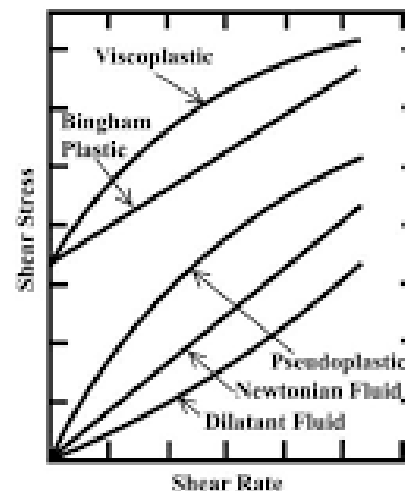
zawiesiny gipsu, pięciotlenku wanadu i bentonitu  
(zmiana właściwości fizycznych lub chemicznych)



# LEPKOŚĆ W FUNKCJI SZYBKOŚCI ŚCINANIA



CIECZE DLA, KTÓRYCH W DOWOLNYM PUNKCIE SZYBKOŚĆ ŚCINANIA JEST FUNKCJĄ TYLKO NAPRĘŻENIA STYCZNEGO PANUJĄCEGO W TYM PUNKCIE



CIECZE NIENEWTONOWSKIE, KTÓRYCH WŁASNOŚCI REOLOGICZNE ZMIENIAJĄ SIĘ W CZASIE

## II. CIECZE LEPKOSPĘŻYSTE

### CIECZE TE WYKAZUJĄ ZARÓWNO CECHY CIECZY JAK I CIAŁ STAŁYCH

Typowym przykładem cieczy lepkospężystej jest smoła wykazująca pewną sprężystość postaci, choć jest jednocześnie cieczą bardzo lepką. Ciecz ta względem lepkości spełnia prawo Newtona a względem sprężystości prawo Hooke'a. Ciecze te spełniają wyprowadzone przez Maxwella równanie:

$$\gamma = \frac{\tau}{\eta} + \frac{\dot{\tau}}{G}$$

gdzie:

$G$  - moduł sztywności,

$\tau = \tau + \tau\delta$  - wzrost naprężenia ścinania,





## RODZAJ CIECZY

REOSTABILNE  
peudoplastyczne i dilatancyjne

REONIESTABILNE  
tikotropowe i reopeksyjne

## LEPKOŚĆ POZORNA

nie zależy od czasu ścinania zależy  
natomiast od szybkości ścinania

zależy od czasu ścinania i od  
szybkości ścinania

## RODZAJ CIECZY

## RODZAJ CIECZY

pseudoplastyczne

dylatacyjne

tikotropowe

reopeksyjne

**rozrzedzanie**  
**ścianiem**  
tj. zwiększanie  
lub zmniejszanie  
szybkości ścinania  
zmniejsza lepkość  
pozorną

**zagęszczanie**  
**ścianiem**  
tj. zwiększanie lub  
zmniejszanie  
szybkości ścinania  
zwiększa lepkość  
pozorną

**rozrzedzanie**  
tj. przy stałej  
szybkości ścinania  
po różnym czasie  
zmniejsza się  
lepkość pozorna

**zagęszczanie**  
tj. przy stałej  
szybkości  
ścianania po  
różnym czasie  
zwiększa się  
lepkość pozorna