โลหะวิทยาเพื่อการควบคุมคุณภาพในการผลิตคลิปสปริงสำหรับเครื่องยึดเหนี่ยวราง

หลักการพื้นฐานของการออกแบบและการผลิตเครื่องยึดเหนี่ยวราง

ภายใต้ “โครงการการเพิ่มขีดความสามารถทางเทคโนโลยีของอุตสาหกรรมในประเทศและการจัดเตรียมร่างมาตรฐานผลิตภัณฑ์ตามข้อกำหนดของโครงการรถไฟความเร็วสูง”

โดย

นาย อมรศักดิ์ เร่งสมบูรณ์

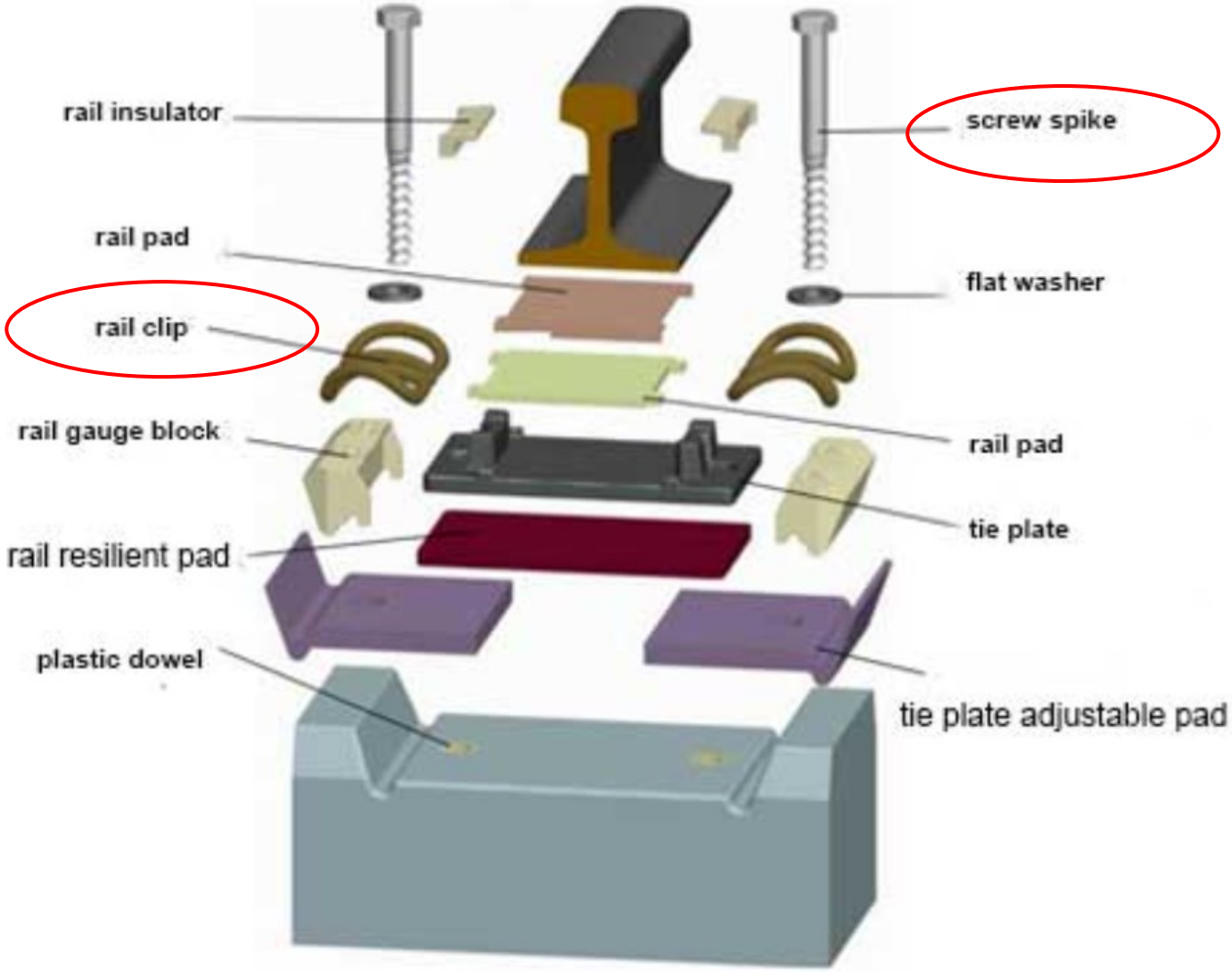
ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

วัตถุประสงค์โครงการ

- เพื่อถ่ายทอดองค์ความรู้ที่สำคัญให้แก่อุตสาหกรรมการผลิตและหน่วยงานวิจัยในประเทศให้สามารถพัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมมาตรฐานสูงเพื่อการใช้ในโครงการรถไฟความเร็วสูง

    - โลหะวิทยาเพื่อการควบคุมคุณภาพใน**การผลิต** รวมถึง*ทราบแนวทางการแก้ไขปัญหา* เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีมาตรฐาน

ชิ้นส่วนที่เป็นโลหะ



http://www.railway-fasteners.com/news/wj-8-rail-fastening-system-installation.html

จำแนกชิ้นส่วนตามกระบวนการผลิต

- **การหล่อขึ้นรูป** เช่น Tie plate, Rail shoulder
- **การทุบและรีดขึ้นรูป** เช่น Screw spike, Bolt nut และอาจมีบางรูปแบบของ Tie plate และ Rail shoulder
- **การดัดขึ้นรูปร้อน** (Hot Forming) เช่น Rail clip

ชิ้นส่วนที่ผลิตด้วยการทุบและรีดขึ้นรูป

Bolt and Nut

Screw spike

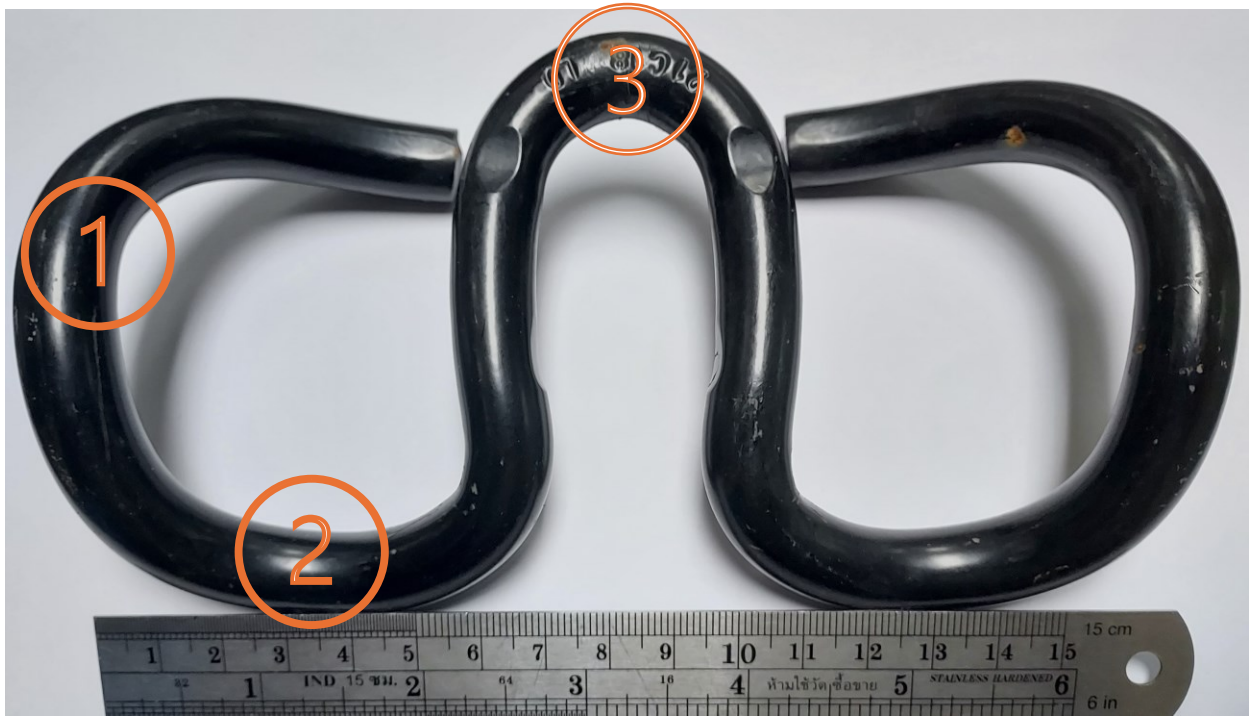
Materials: Low and medium carbon steel, low alloy steel

http://www.railway-fasteners.com

ชิ้นส่วนที่ผลิตด้วยกระบวนการดัดขึ้นรูป

Materials: 55Si7,60Si7 (JIS: SUP6, SUP7)

Rail clip (S)



Rail clip (L)

เหล็กสปริงสำหรับการผลิต Rail clip

- เกรดของเหล็กสปริงที่นิยมใช้ทั่วไป
  - เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (0.3-0.6%C)
  - SUP6, SUP7 (60Si7 : 0.56-0.64 %C, 1.5-2.0 %Si, 0.7-1.1 %Mn) , SUP12
  - SUP9, SUP 11 (0.52-0.60 %C, 0.15-0.35 %Si, 0.65-0.95 %Mn, 0.65-0.95 %Cr)

คำถาม ?

- คลิปสปริงสามารถขึ้นรูปเย็นได้หรือไม่ ? สปริงถูกดัดงอได้ เพราะเกิดอะไรขึ้นในเนื้อโลหะ ?
- เพราะเหตุใด ชิ้นงานจึงมีโอกาสแตกเมื่อขึ้นรูปเย็น ?
- ถ้าต้องการนำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปเย็นไปใช้งาน โดยไม่ให้แตกหักง่าย ต้องทำอย่างไร เพราะอะไร ?
- เมื่อให้ความร้อนและขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง ทำไมชิ้นงานจึงแตกยากขึ้น และใช้แรงน้อยลง กลไกที่เกิดขึ้นคือ ?
- อุณหภูมิต้องสูงเท่าไหร่ จึงเรียกว่า ขึ้นรูปร้อน ?

เนื้อหา

1. สมบัติทางกลที่ควรทราบของคลิปสปริง ในมุมมองของการใช้งานและการผลิต
2. กลไกการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นและแบบถาวร (การขึ้นรูปเย็น)
3. กลไกการเพิ่มความแข็งแรง
4. กลไกการอบอ่อน
5. **การขึ้นรูปร้อน**

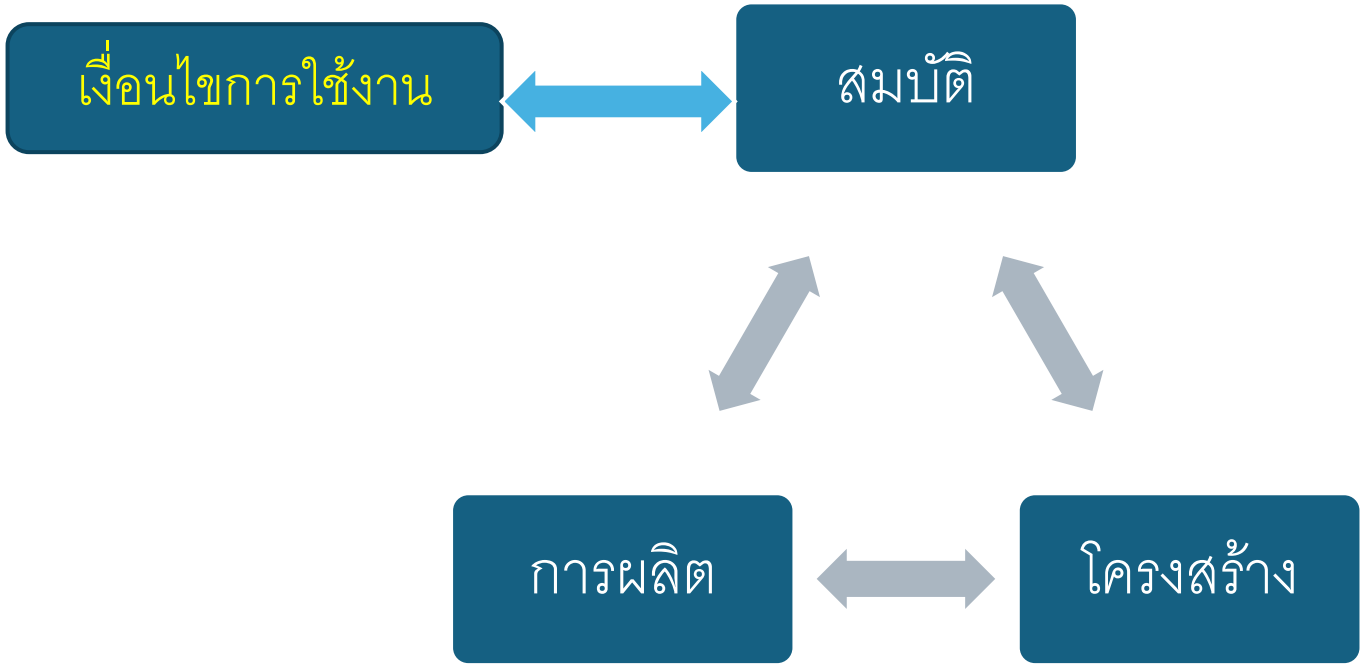
1. สมบัติทางกลที่ควรทราบของคลิปสปริง

- สมบัติของวัสดุคืออะไร ?
  - *เมื่อวัสดุ ได้รับการกระตุ้นจากภายนอก มันจะเกิดการตอบสนองบางอย่าง*
  - ***สมบัติ คือ ลักษณะเฉพาะของวัสดุในแง่ของชนิดและปริมาณการตอบสนอง***

- เราสามารถควบคุมหรือเปลี่ยนแปลงสมบัติบางอย่างของโลหะได้หรือไม่ ? เปลี่ยนอย่างไร ?

ความสำคัญของการควบคุมโครงสร้างทางโลหะวิทยา

- โลหะวิทยา คือ ศาสตร์ที่กล่าวถึง***ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างและสมบัติของโลหะ***
- เราสามารถ**เปลี่ยนสมบัติ**บางอย่างของวัสดุได้ โดยการ**เปลี่ยนแปลงโครงสร้าง**ด้วยกระบวนการต่างๆ



สมบัติทางกล

- สมบัติทางกลหมายถึง ***ความสามารถในการรับแรง*** หรือภาระ (Load) ลักษณะต่างๆ
- มีวิธีการทดสอบหาค่าสมบัติทางกลอย่างไร ?

    การทดสอบความแข็ง

    การทดสอบความเหนียว

    การทดสอบแรงดึง

    การทดสอบความทนต่อการล้า

- **สมบัติส่วนใหญ่จะขึ้นกับโครงสร้าง** คือ ชนิด ขนาด รูปร่าง ปริมาณ และการกระจายของเฟสต่างๆ

Hardness

- คือ ความต้านทานของวัสดุต่อการกดหรือการขีดข่วน
- Rockwell หัวกดมีทั้งกลมและกรวยแหลม
- Brinell หัวกลม วัดเส้นผ่านศูนย์กลาง
- Knoop,Vickers microhardness หัวปิรามิด

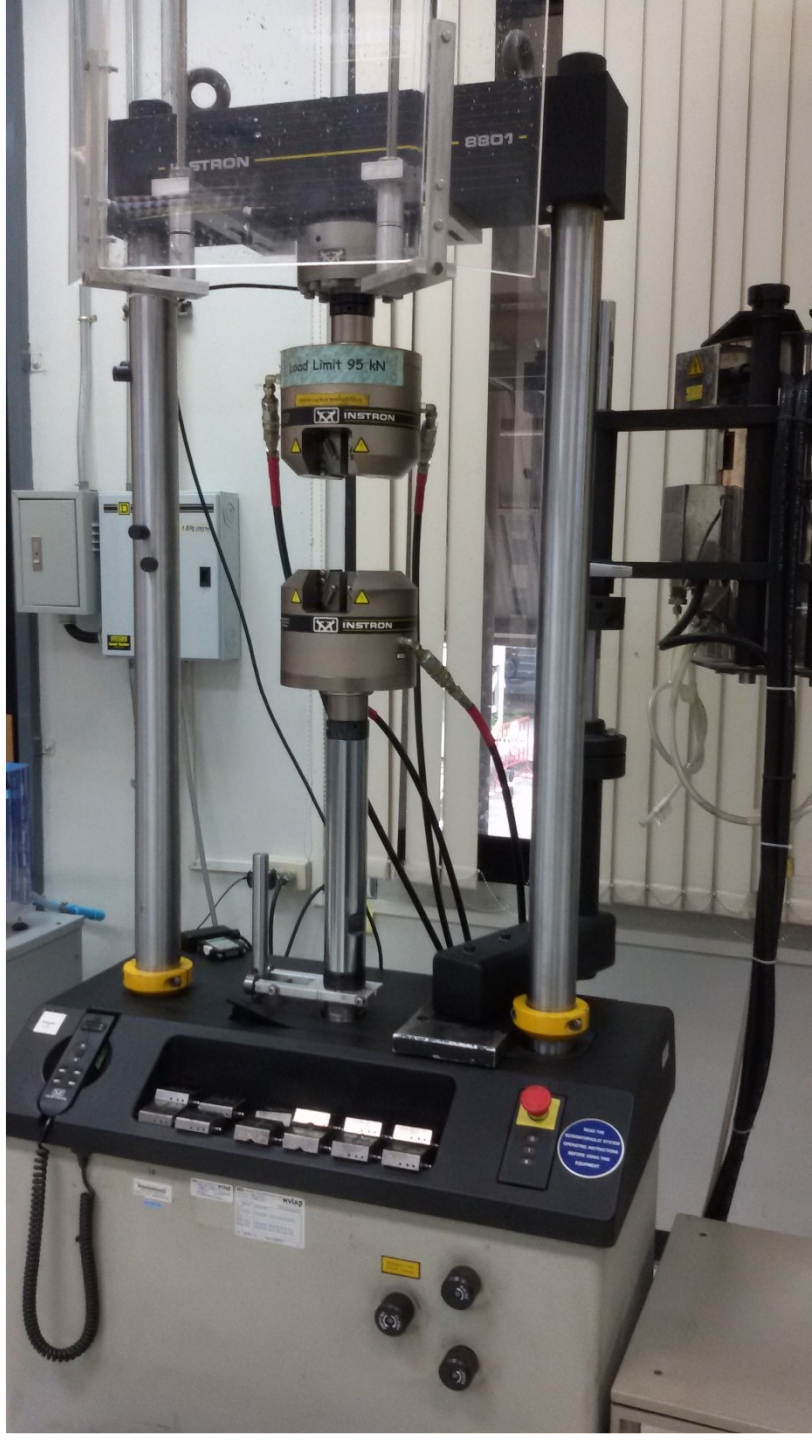
Toughness

ความเหนียวมี 2 ความหมาย

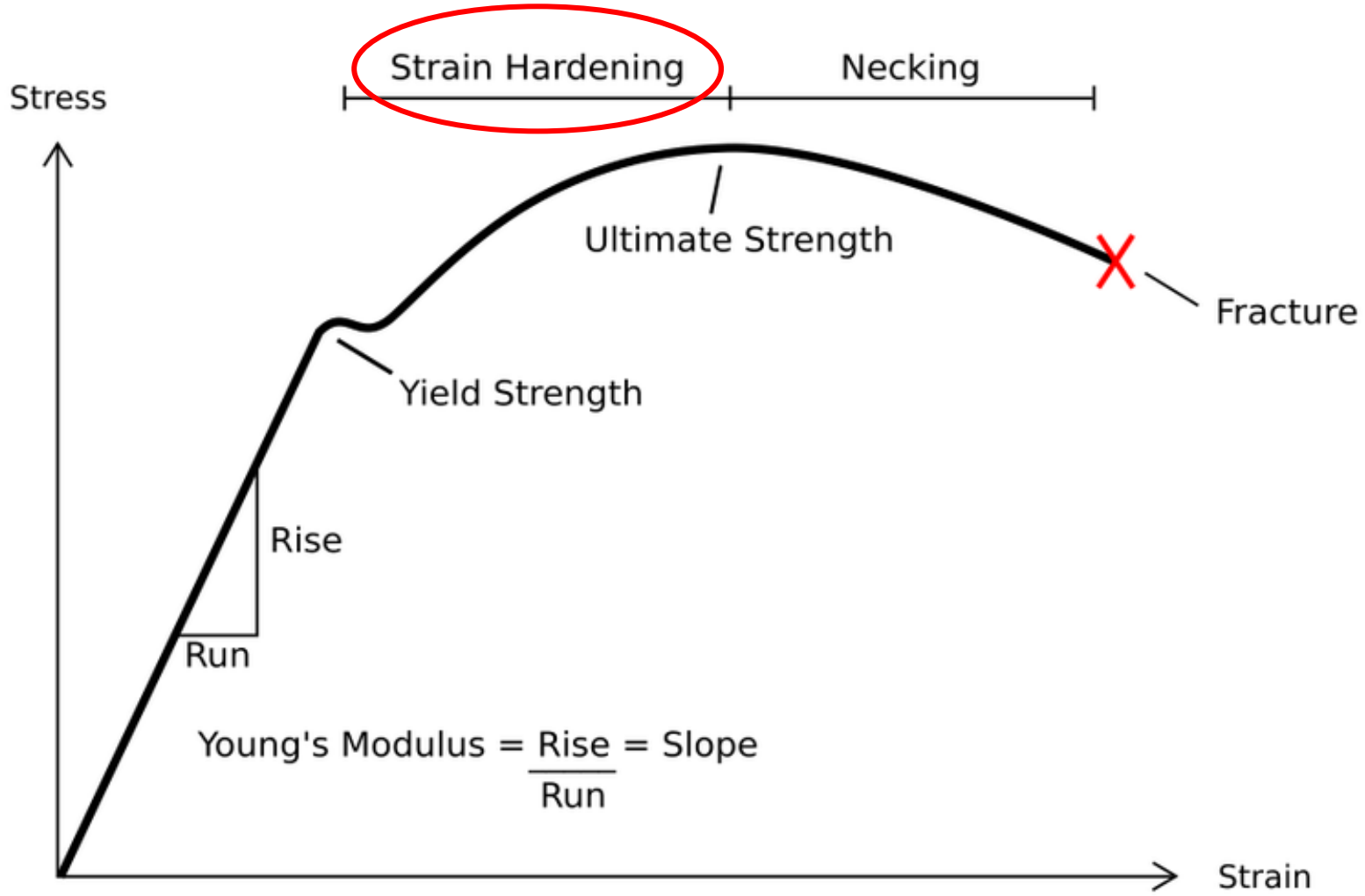
- ความสามารถในการยืดตัว (Ductility)
- ความต้านทานการเกิดรอยร้าว หรือ ความสามารถในการรับพลังงานก่อนการแตกหัก (Toughness)

การทดสอบแรงดึง

- ข้อมูลที่ได้รับ คือ แรง กับ ระยะยืด
- วัสดุเดียวกัน ชิ้นงานใหญ่หรือเล็ก ค่าแรงและระยะยืด ย่อมไม่เท่ากัน
- เพื่อกำจัดตัวแปรด้านขนาดออก
  - จึงนำแรงหารด้วยพื้นที่หน้าตัดเดิม และเรียกว่า ความเค้นทางวิศวกรรม
  - ระยะยืด จับหารด้วย ความยาวเดิม เรียกว่า ความเครียดทางวิศวกรรม

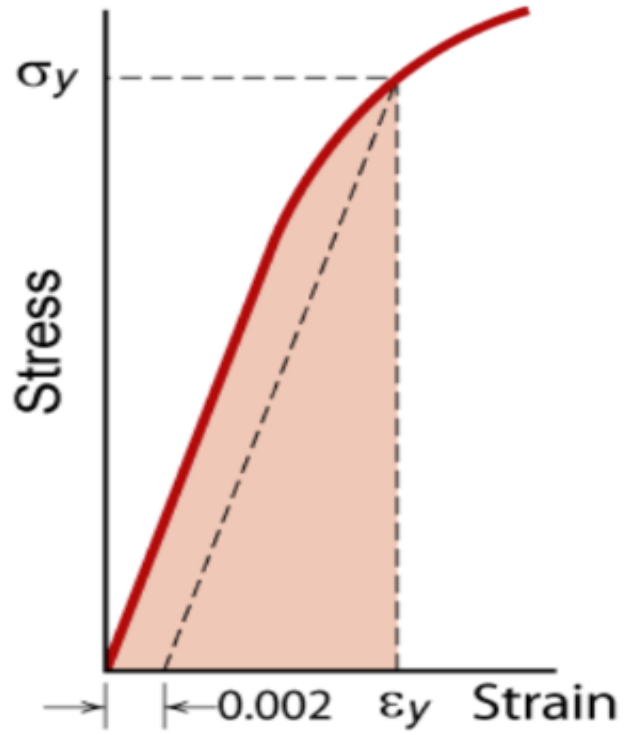


กราฟแสดงผลการทดสอบแรงดึง



https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Stress_Strain_Ductile_Material.pdf

สมบัติที่ต้องพิจารณาในการผลิตสปริง



Energy of elasticity shown under the curve of the stress-strain curve.

Credit: Callister

Young's Modulus (E): ความแข็งแกร่งของวัสดุ ส่งผลต่อการรับแรงสูงสุดของสปริง

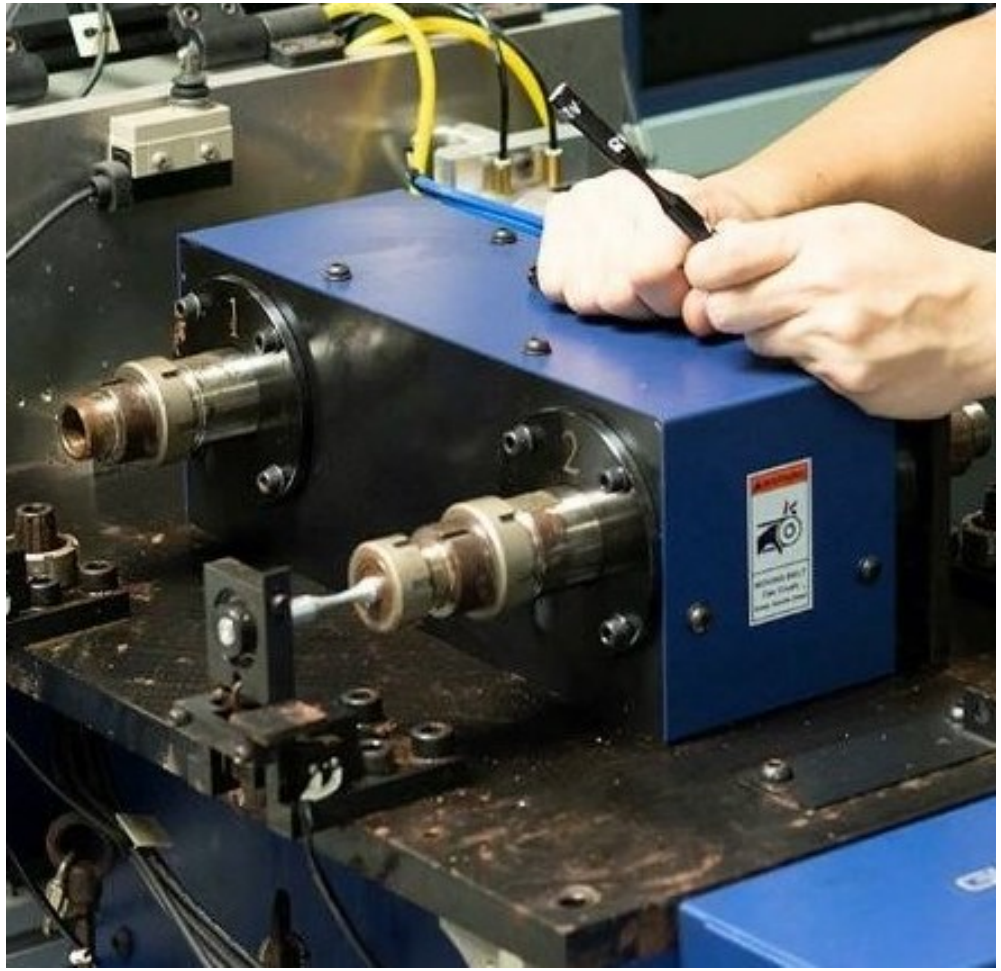
Modulus of Resilience: ความสามารถในการรับพลังงานก่อนการเสียรูปแบบถาวร สะสมแล้วปลดปล่อยพลังงาน

Credit : Figure adapted from Callister

Fatigue

- หมายถึง การแตกร้าวของวัสดุ เมื่อได้รับแรงซ้ำไปซ้ำมา
- มีความสำคัญมาก เพราะ
  - เกิดขึ้นภายใน มองไม่เห็น
  - เกิดที่ความเค้นต่ำ
  - กว่า 90 % ของการแตกหักของชิ้นส่วนเกิดขึ้นจากการล้า

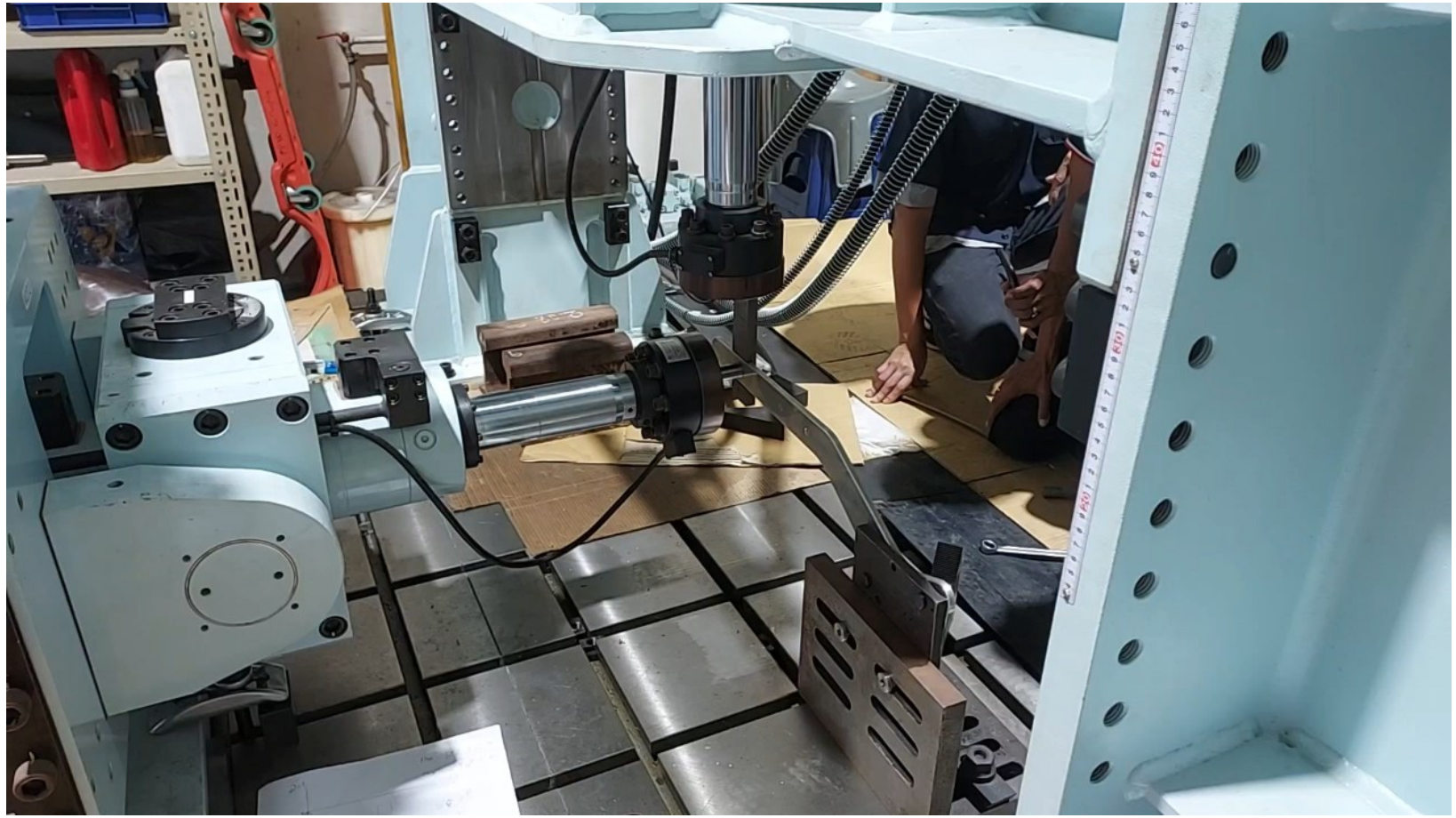
การล้า (Fatigue) หมายถึง การแตกร้าวของวัสดุ เมื่อได้รับแรงซ้ำไปซ้ำมา



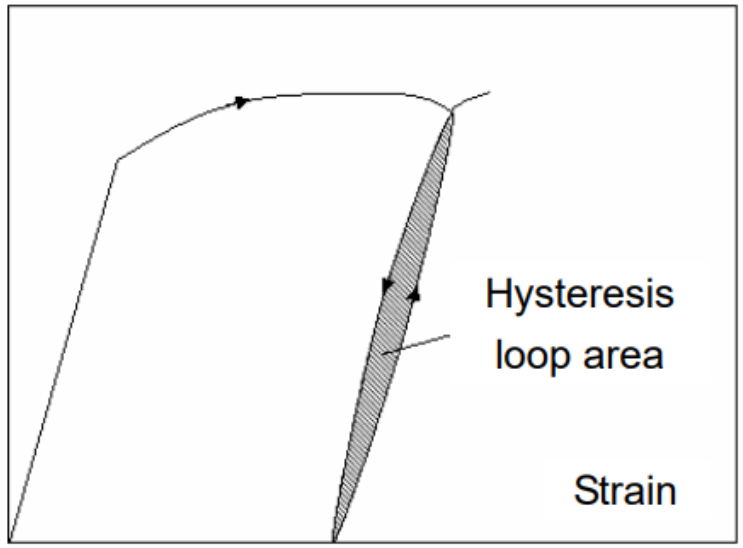
- ทดสอบชิ้นงานได้พร้อมกัน 4 ตัวอย่าง
- ทดสอบความล้าในสภาวะการกัดกร่อน
- ทดสอบความล้าในสภาวะที่ต้องใช้อุณหภูมิสูง

เครื่องทดสอบการล้า (Rotating bending fatigue testing machine)

เครื่องทดสอบการล้าแบบหลายแนวแกน



Sag resistance



Schematic diagram of bauschinger torsion test.

Bauschinger effect เป็นปรากฏการณ์ Strain softening เมื่อชิ้นงานถูกให้แรงสลับแบบทิศตรงข้ามกับแรงเดิม

- คือ ความสามารถในการรักษารูปทรงและความแข็งแกร่งของสปริงเมื่อผ่านการใช้งานซ้ำๆ
- ทดสอบหาค่าด้วยวิธี Bauschinger torsion test โดยพื้นที่ของ hysteresis loop แสดงถึงค่า Sag resistance
  - การเติม 1.5% Si ให้ค่า sag resistance ที่ดี
  - เมื่อขนาดเกรนเล็กลงค่า sag resistance จะเพิ่มขึ้น
  - การเติม V และ Nb ช่วยเพิ่มค่า sag resistance
- ปัจจัยที่มีผลต่อ Bauschinger effect คือ
  - ส่วนผสมทางเคมี
  - ขนาดเกรน
  - ขนาดและการกระจายตัวของคาร์ไบด์

Credit: Sangwoo choi Optimization of microstructure and properties of high strength spring steel, Ph.D. Thesis, Jan 2011

สมบัติที่ต้องพิจารณาในการผลิตสปริง

- High tensile strength : Young's modulus
- Good *sag resistance together with fatigue*
  - Fatigue strength
  - sag resistance

    - Sag คือปรากฏการณ์ที่สปริงเสียรูปทรง หรือความแข็งแกร่งไป เนื่องจากการรับแรงแบบซ้ำๆ

โครงสร้างของโลหะ

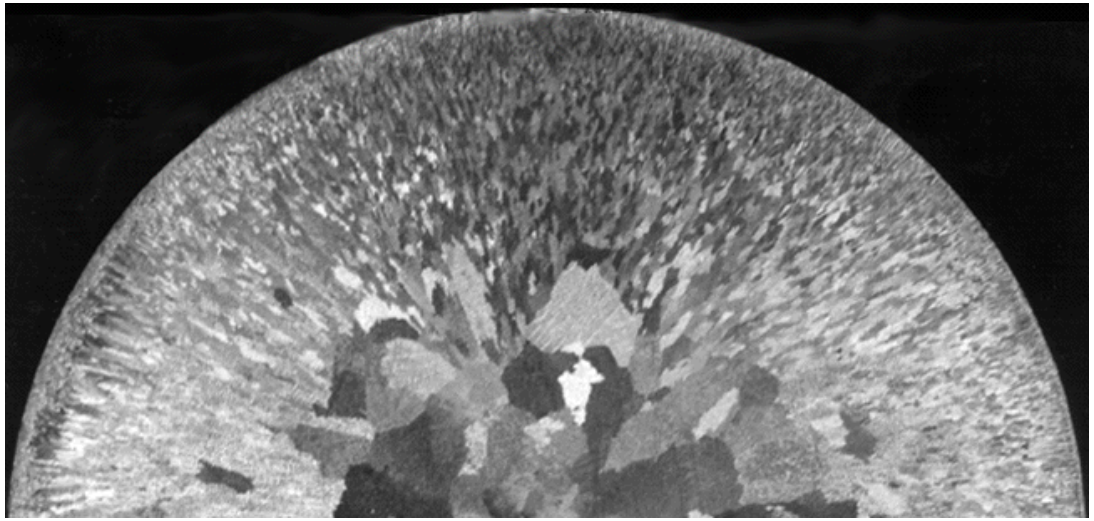
- ***โครงสร้าง*** เกี่ยวเนื่องกับการจัดเรียงองค์ประกอบภายในของวัสดุ

  แบ่งเป็น 3 ระดับ คือ

  - โครงสร้างมหภาค (ดูภาพรวม)
  - โครงสร้างจุลภาค (เกรน ขอบเกรน เฟส สารมลทิน ฟองแก๊ส รอยร้าว)
  - โครงสร้างผลึก (พันธะอะตอม)

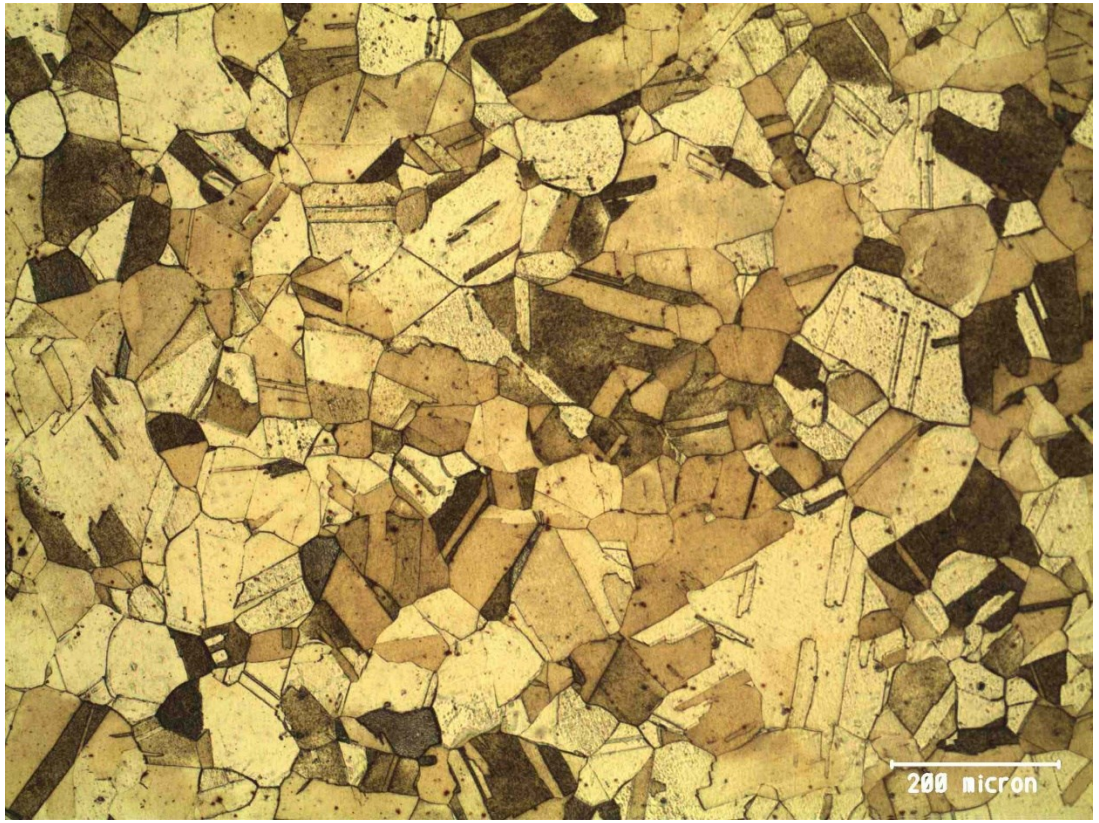
โครงสร้างมหภาค

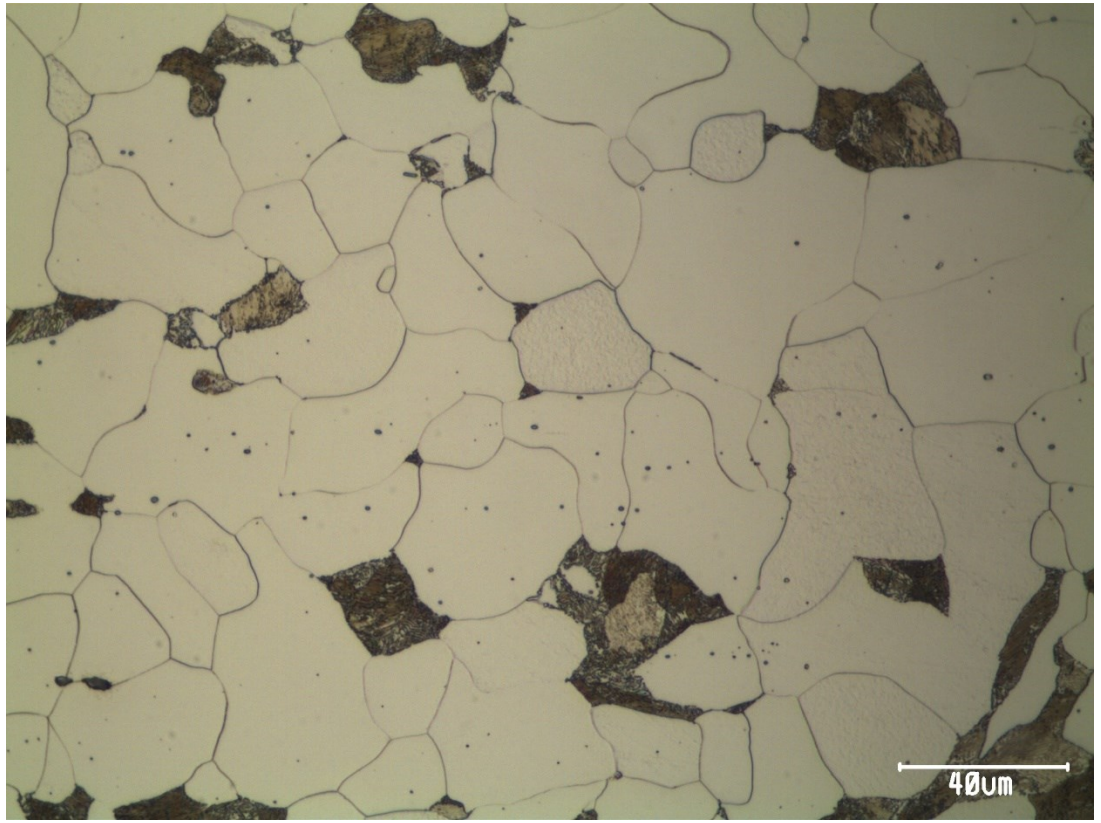
Casting



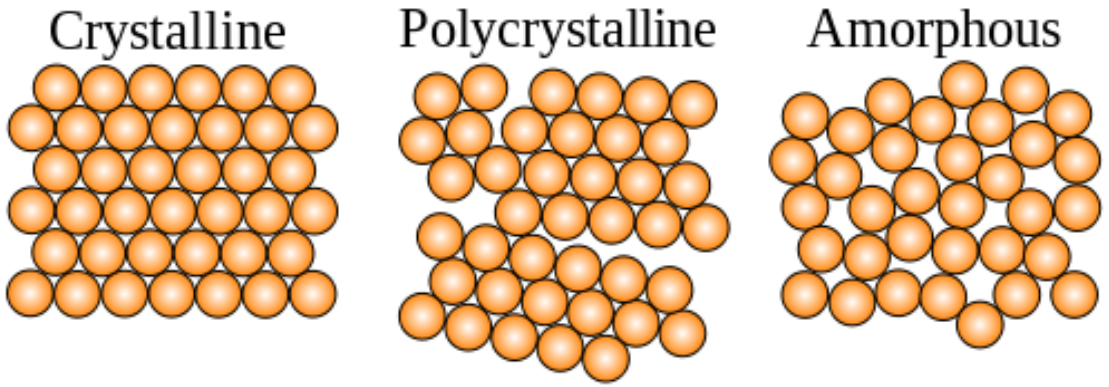
Forging

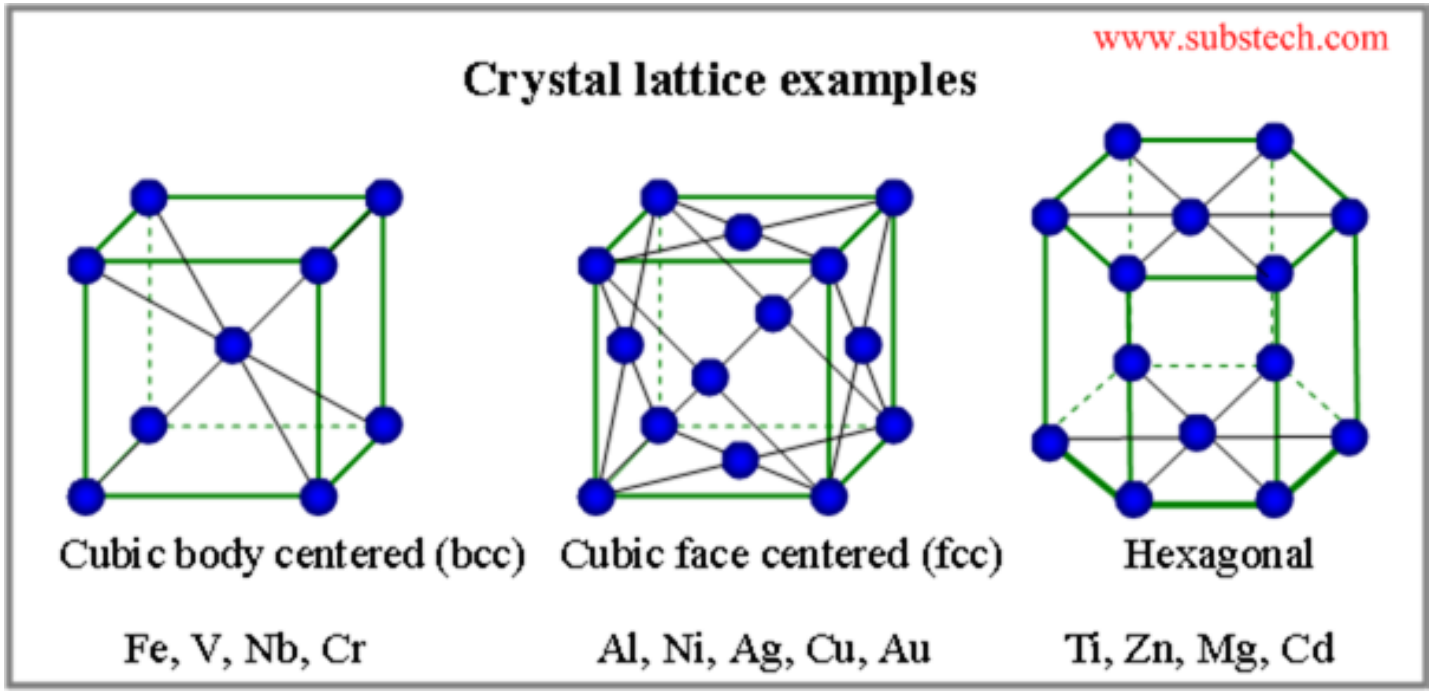
โครงสร้างจุภภาค





โครงสร้างผลึก (พันธะอะตอม)

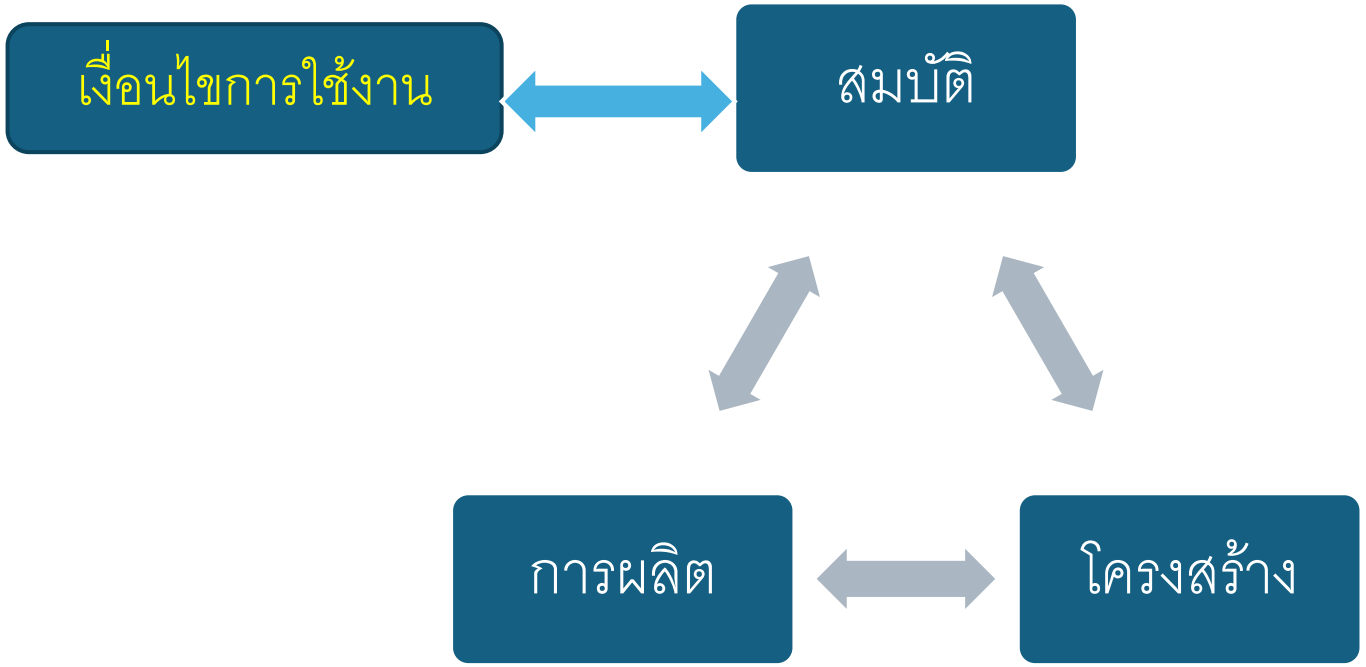




https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=metals_crystal_structure

ความสำคัญของการควบคุมโครงสร้างทางโลหะวิทยา

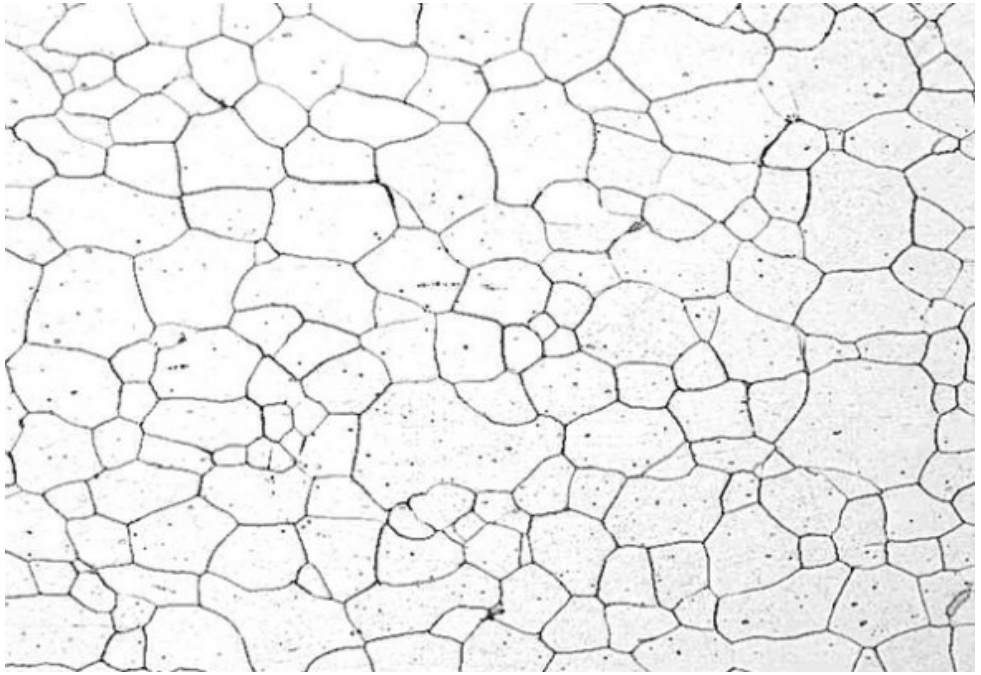
- โลหะวิทยา คือ ศาสตร์ที่กล่าวถึง***ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างและสมบัติของโลหะ***
- เราสามารถ**เปลี่ยนสมบัติ**บางอย่างของวัสดุได้ โดยการ**เปลี่ยนแปลงโครงสร้าง**ด้วยกระบวนการต่างๆ

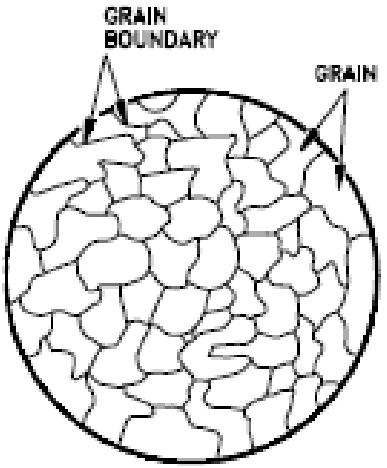


โครงสร้างของโลหะ

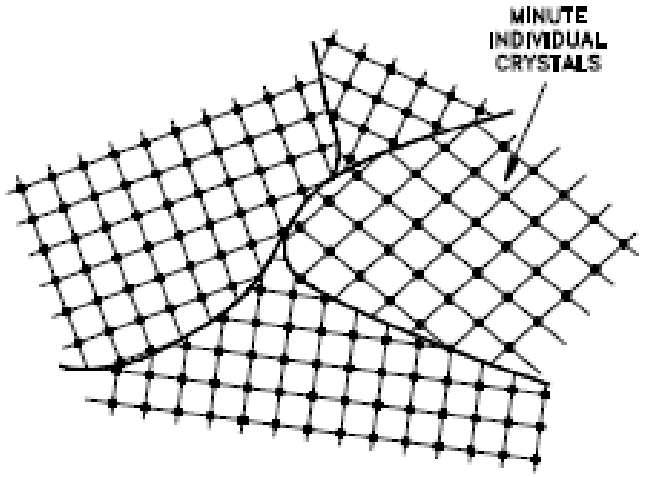
- โลหะหนึ่งชิ้น มีองค์ประกอบเป็นอย่างไร ?
- โครงสร้างจุลภาค (เกรน คืออะไร ?)
- โครงสร้างผลึก ?

โครงสร้างจุลภาค





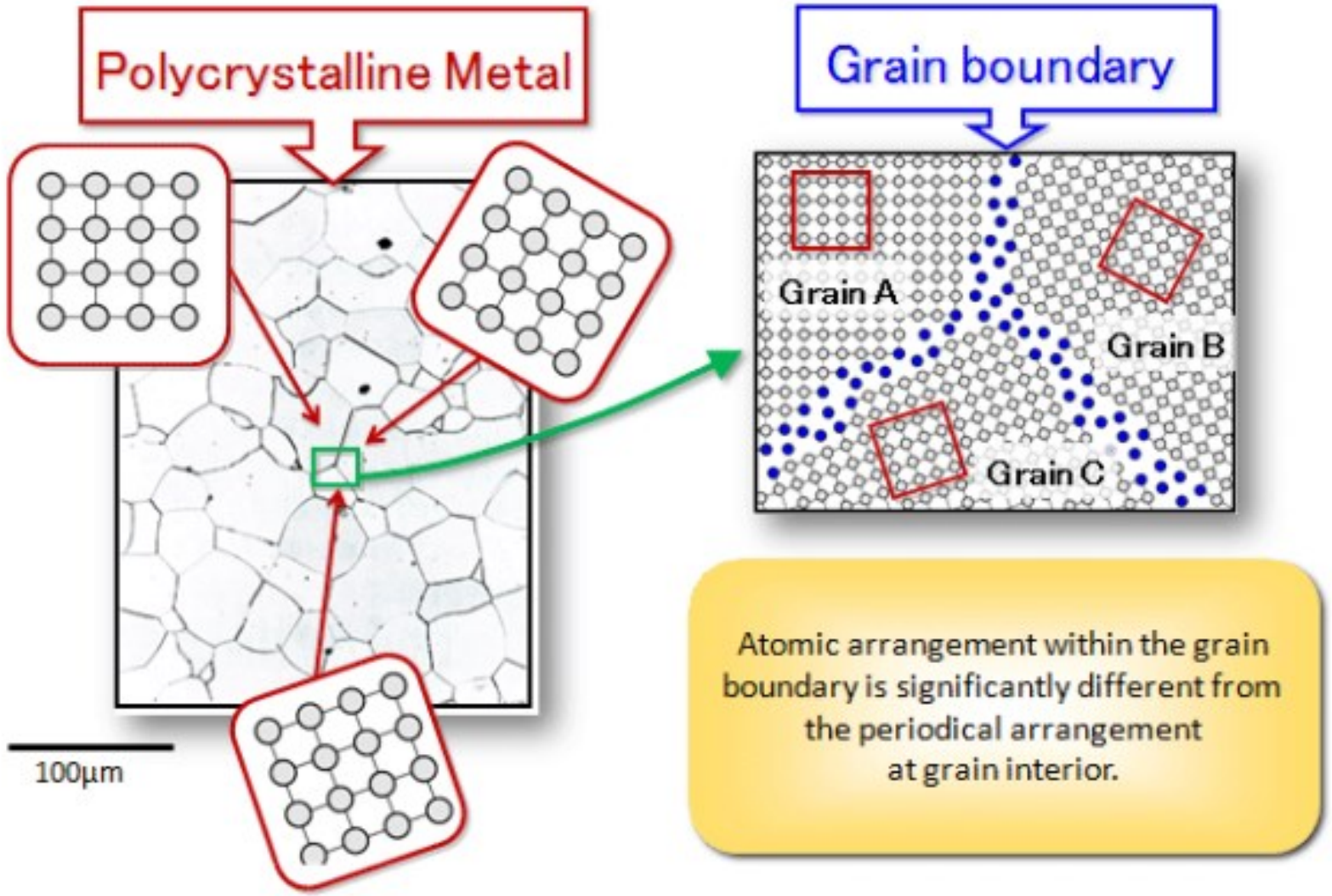
(A)



(B)

https://nuclear-power.com/wp-content/uploads/2019/10/Grains-Grain-Boundaries.png

ภาพรวมของโครงสร้างในระดับอะตอม

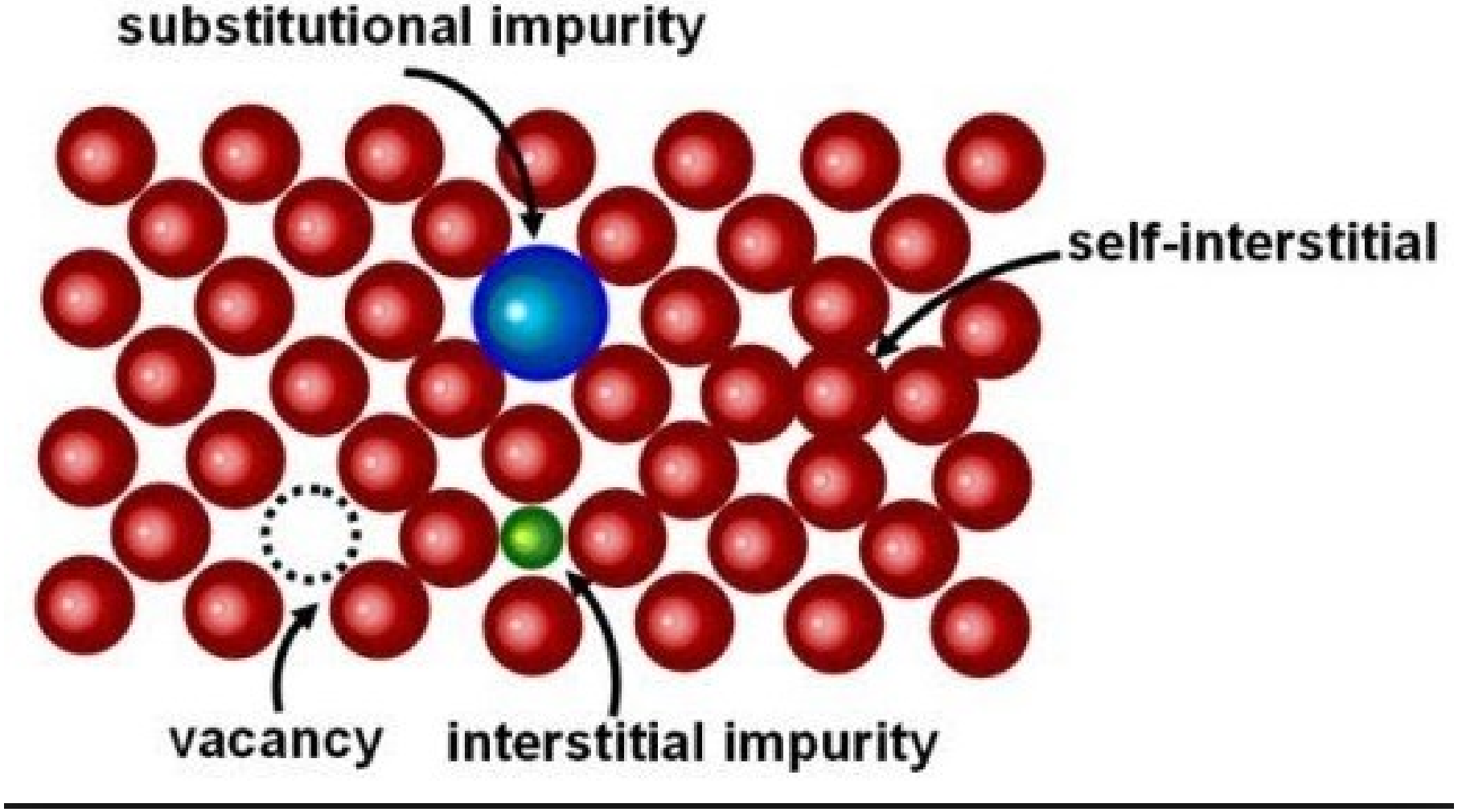


https://www.researchgate.net/figure/a-Grain-boundaries-in-a-polycrystal-b-An-example-atomic-arrangement-at-triple_fig73_322738368

ตำหนิในผลึกของแข็ง

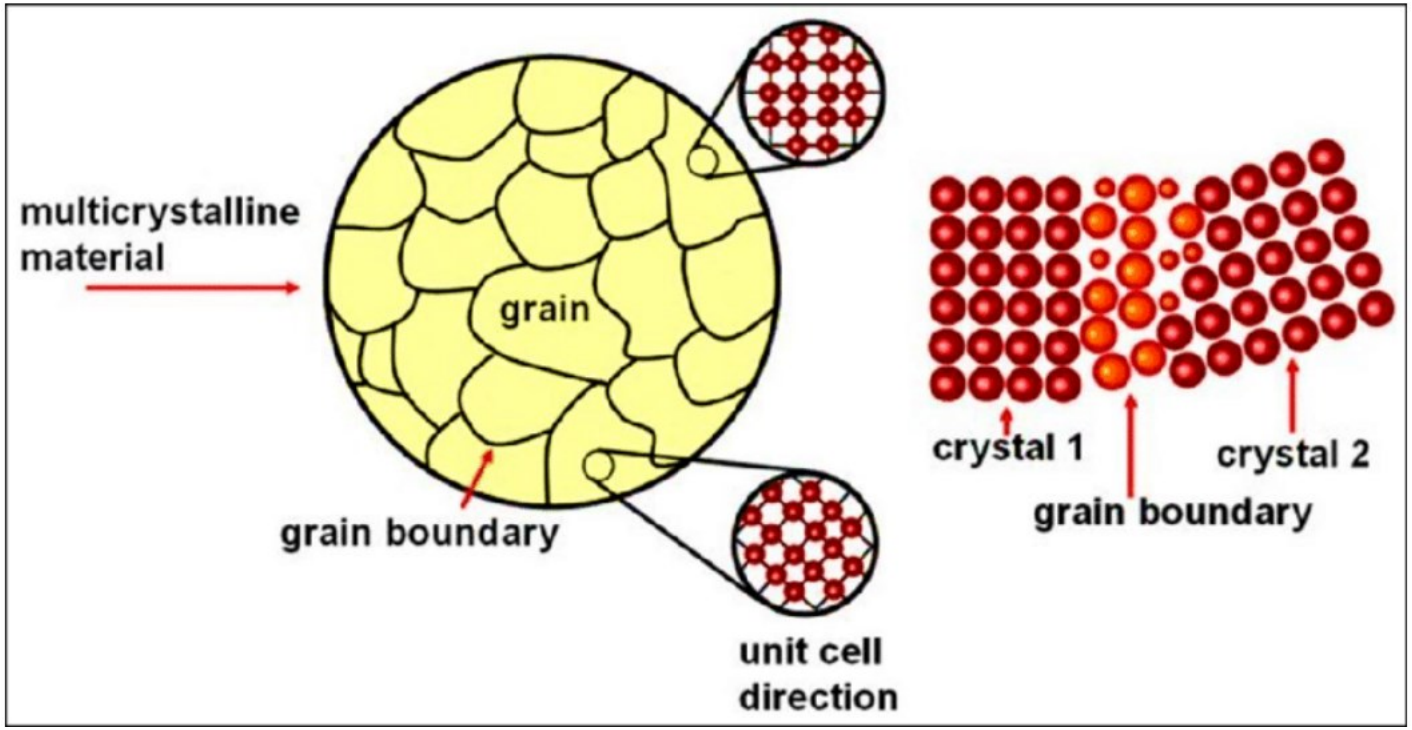
- **จุด**
  - ช่องว่าง (Vacancy)
  - อะตอมแทรก (Interstitials)
  - อะตอมแทนที่ (Substitutional)
- **เส้น**
  - Dislocation (Edge , Screw)
- **พื้นผิว**
  - ขอบเกรน ขอบของแต่ละเฟส (Twin , Tilt Boundary, Twist Boundary, Stacking Faults)

ตำหนิแบบจุด



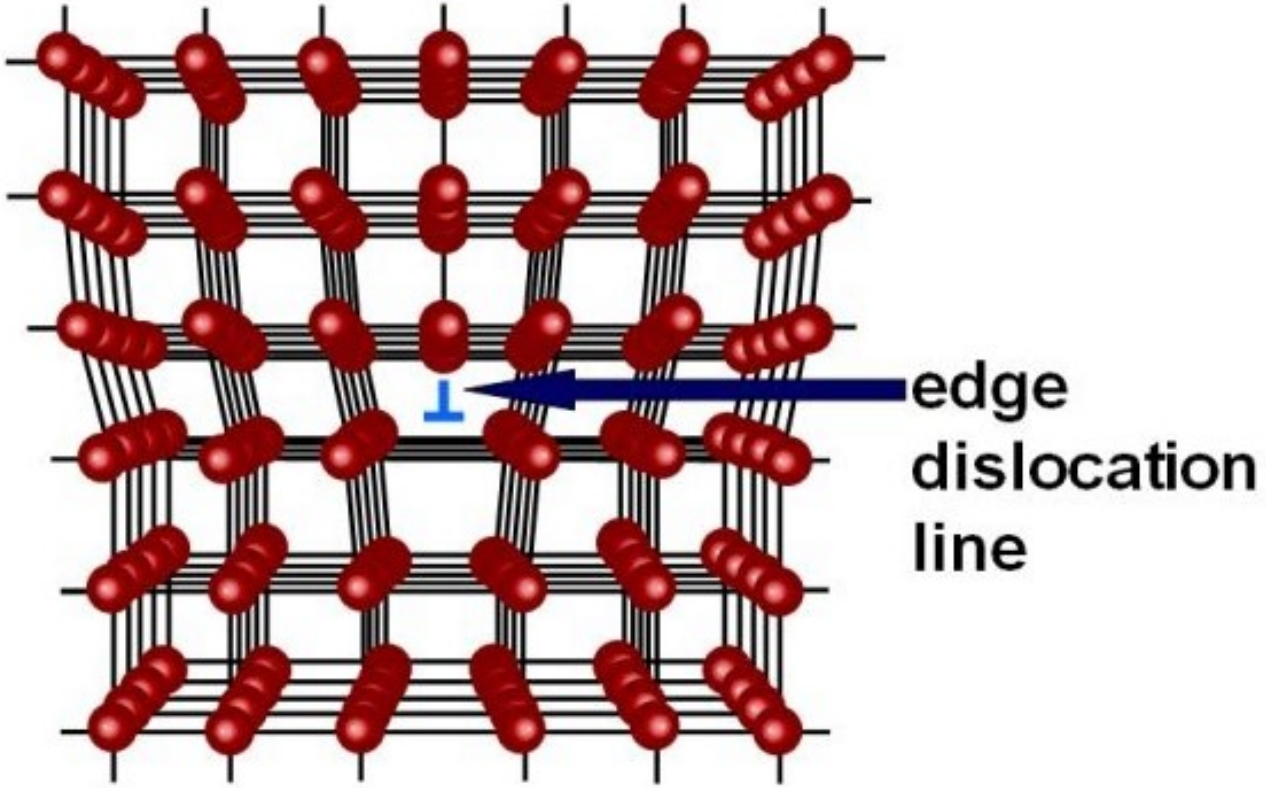
https://www.weizmann.ac.il/materials/igorl/sites/materials.igorl/files/uploads/4_-_defects_in_crystalls_3.pdf

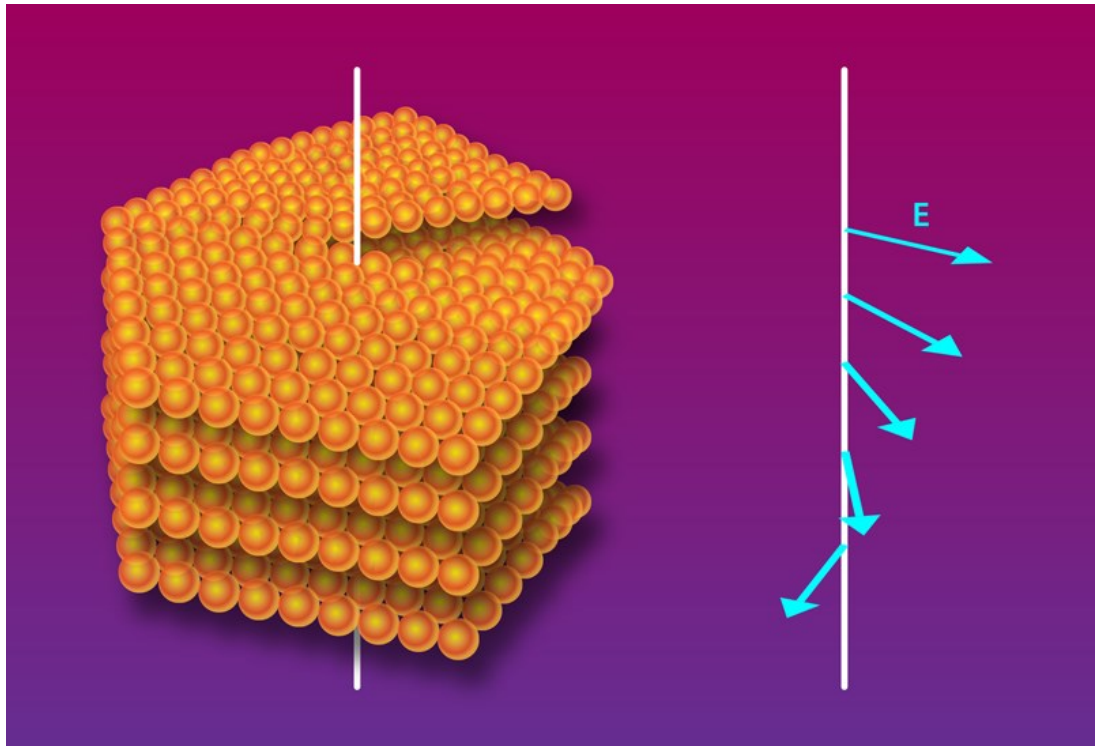
ตำหนิแบบพื้นผิว



https://www.researchgate.net/figure/Grains-and-grain-boundaries-in-a-polycrystal-To-the-right-defect-in-atomic-structure_fig1_335054869

ตำหนิแบบเส้น

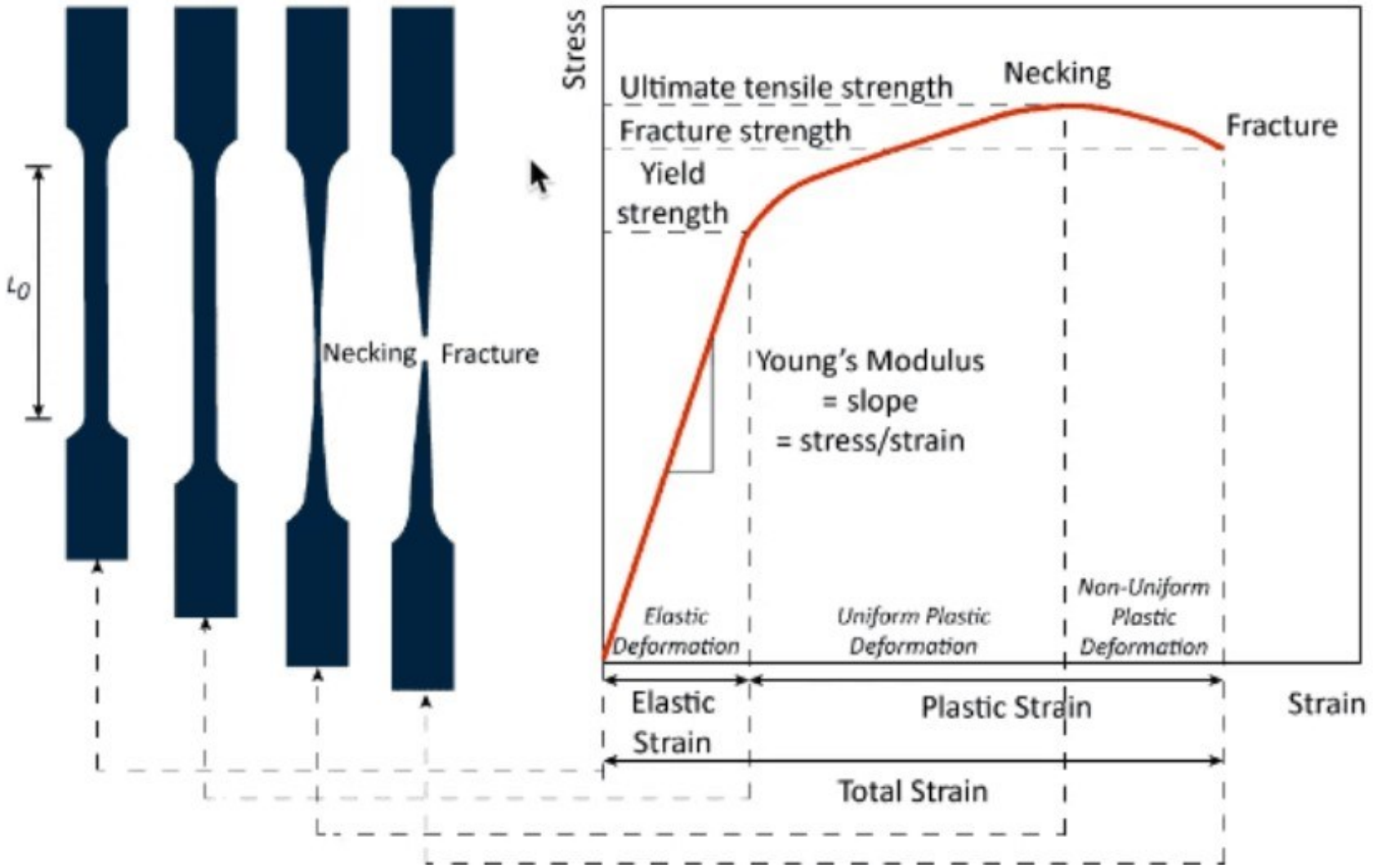




Screw dislocation

https://physics.aps.org/articles/v11/78

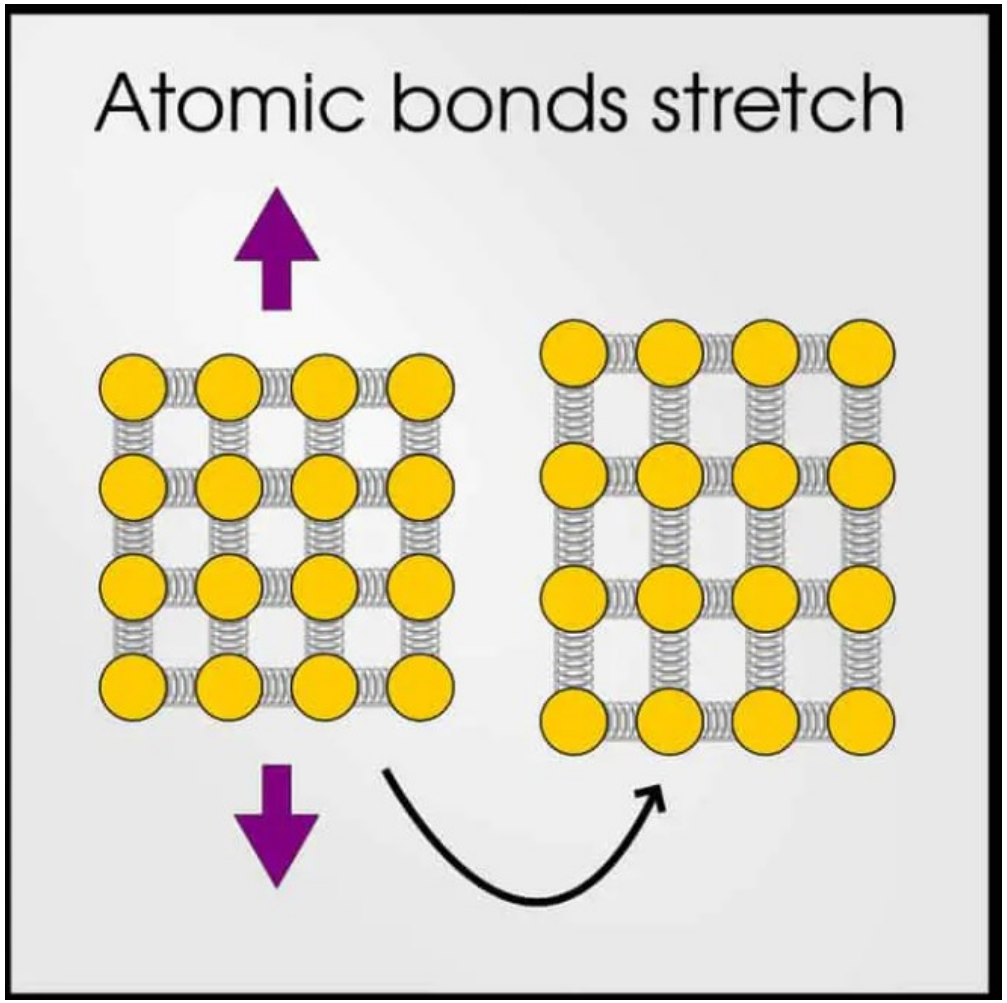
2.กลไกการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นและแบบถาวร (การขึ้นรูปเย็น)



https://www.simscale.com/docs/simwiki/fea-finite-element-analysis/what-is-a-stress-strain-curve/

Elastic Deformation

- การที่อะตอมถูกแรงกระทำแต่พันธะยังไม่ขาดหลุดออกจากอะตอมข้างเคียง
- เมื่อปลดแรงออก ชิ้นงานยังยาวเท่าเดิม
- ค่าความชันของกราฟช่วงนี้ คือค่า Elastic Modulus

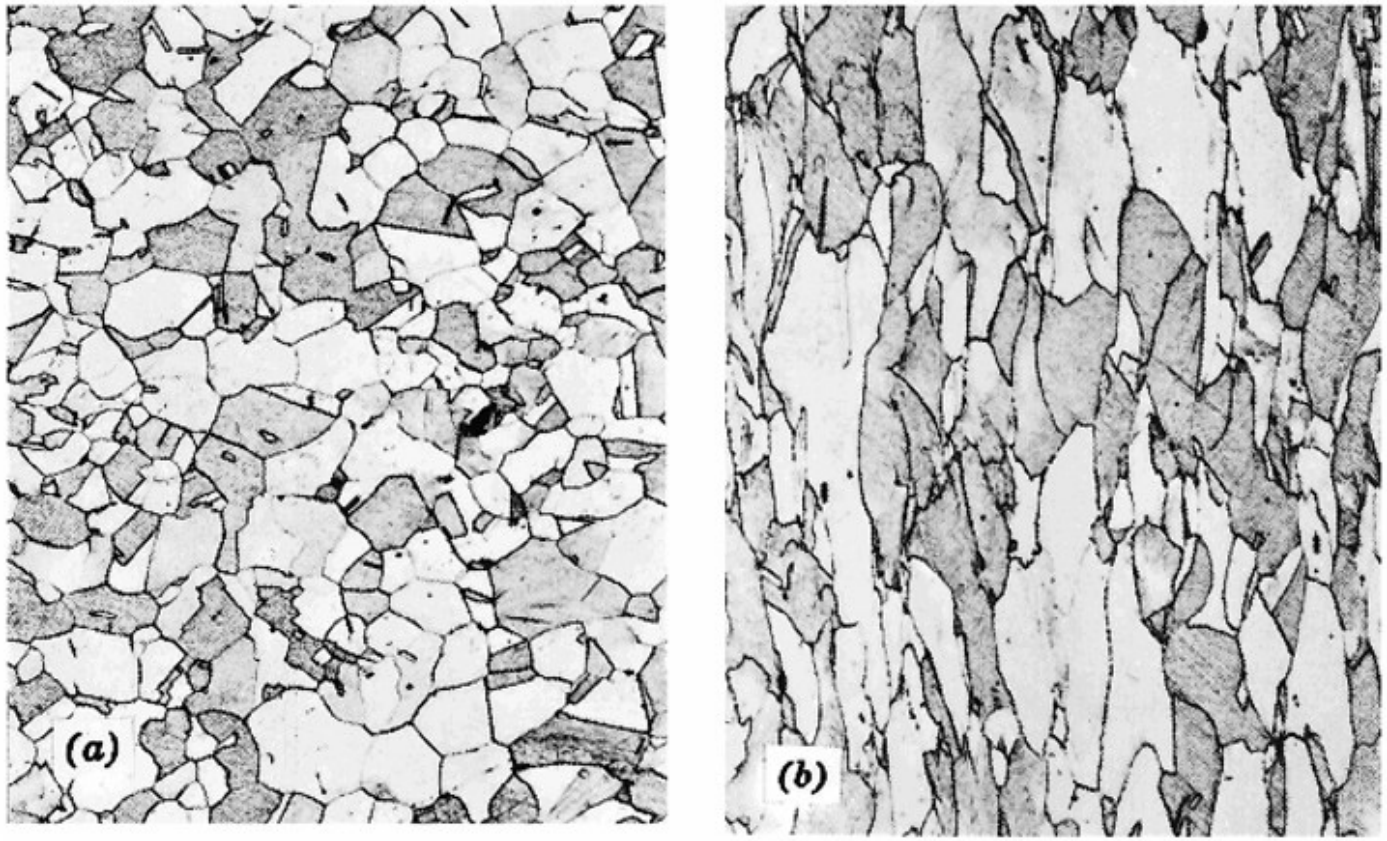


https://msestudent.com/what-is-yield-in-materials-yield-stress-yield-strength-and-yield-point/

Plastic Deformation

- เมื่อปลดแรงออก อะตอมก็ไม่สามารถกลับไปอยู่ที่เดิมได้ เนื่องจากพันธะเดิมได้ขาดไปแล้ว
- Yield stress
- 0.002 Proof stress
- Ultimate Tensile Stress
- Ductility

โลหะถูกเปลี่ยนรูปแบบถาวรได้อย่างไร ?

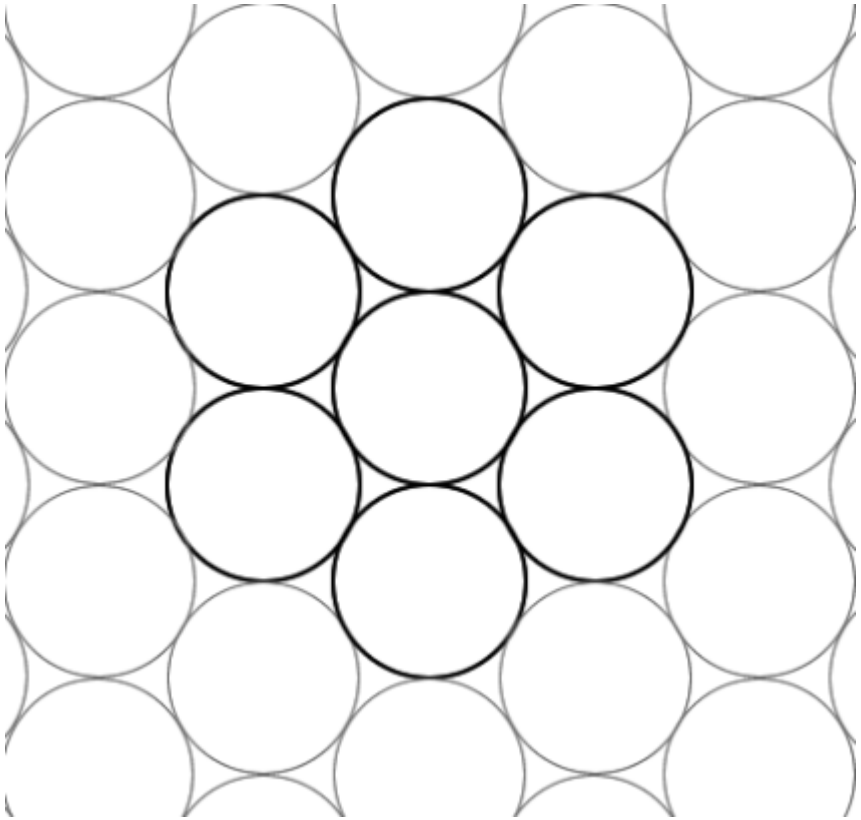


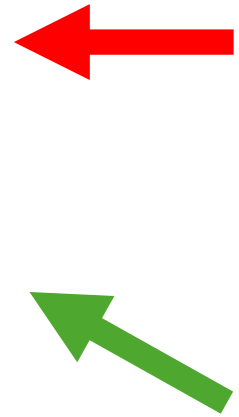
Before *After*

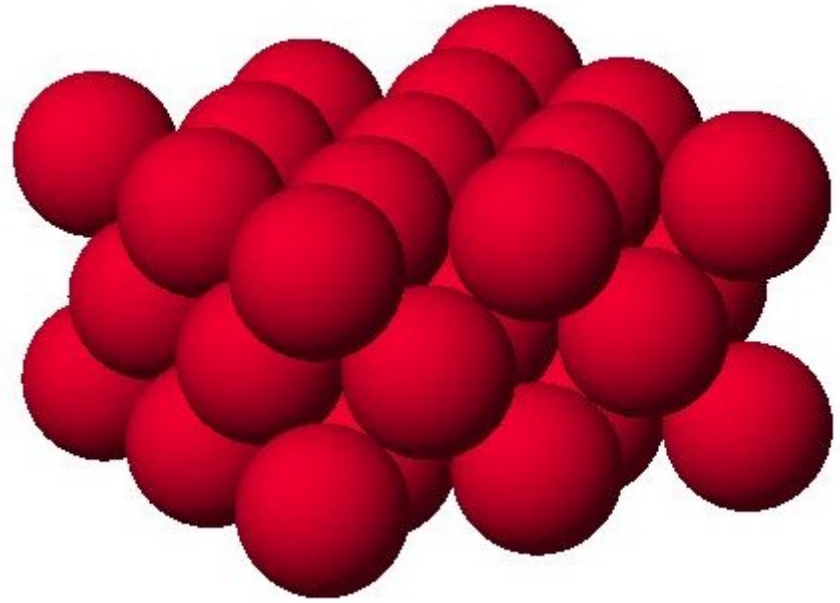
คลิปสปริงสามารถขึ้นรูปเย็นได้หรือไม่ ? สปริงถูกดัดงอได้ เพราะเกิดอะไรขึ้นในเนื้อโลหะ ?

(W.G.Moffatt,The structures and properties of material,Vol.1,structure,P.140)

ถ้าออกแรงดันลูกบอลในทิศทางต่างๆกัน จะใช้แรงที่ทำให้เคลื่อนเท่ากันหรือไม่?

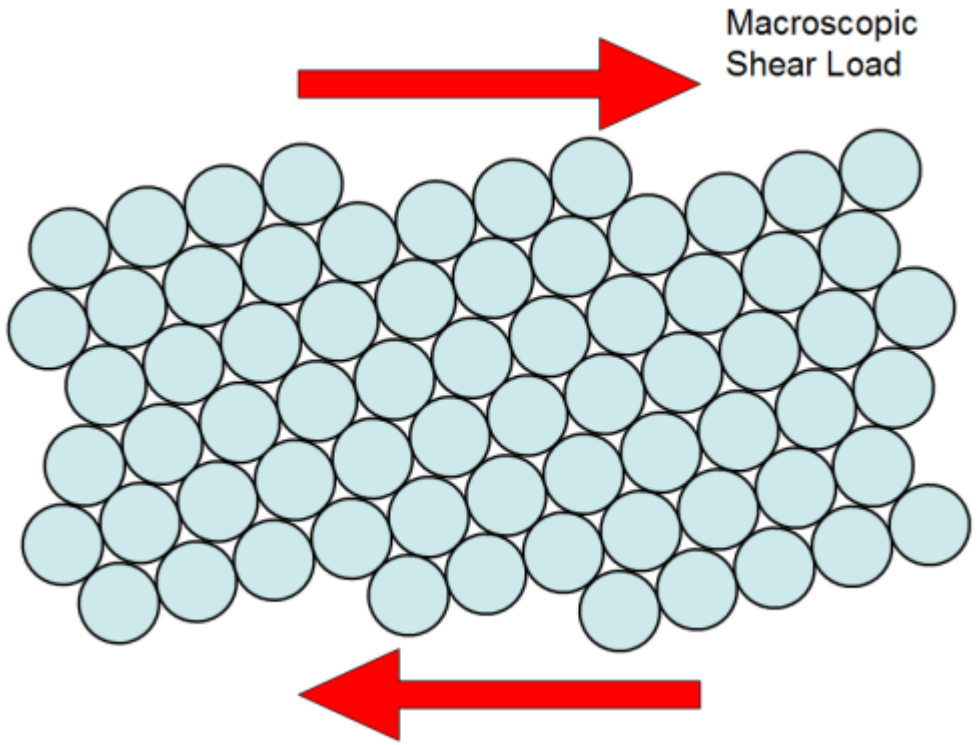


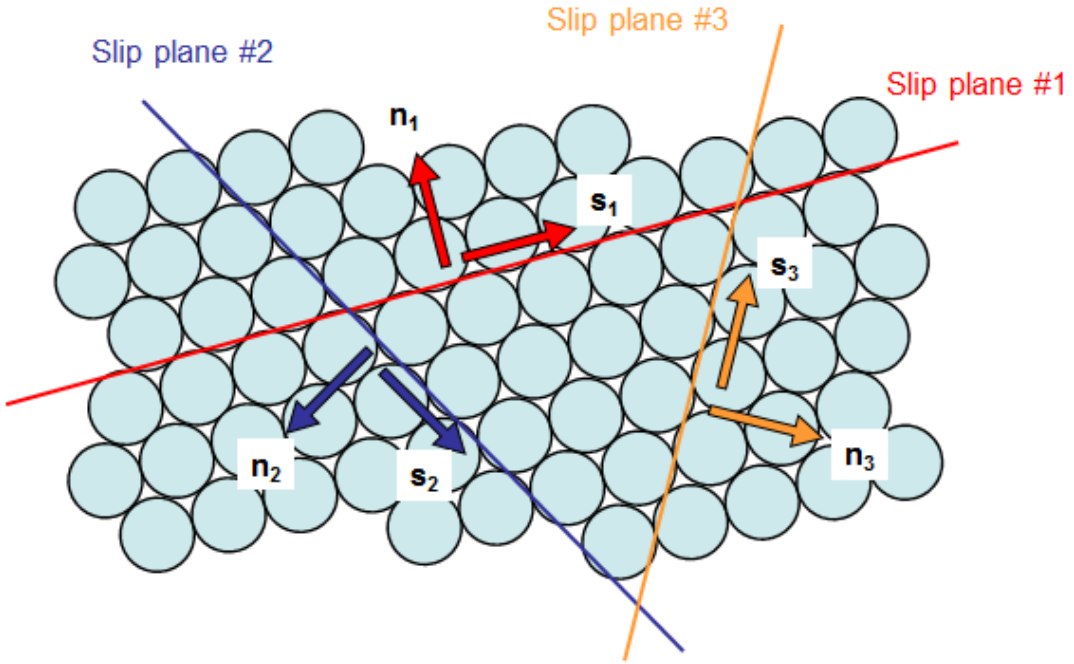




https://www.ntci.on.ca/chem/sch4u/crystalpacking.pdf

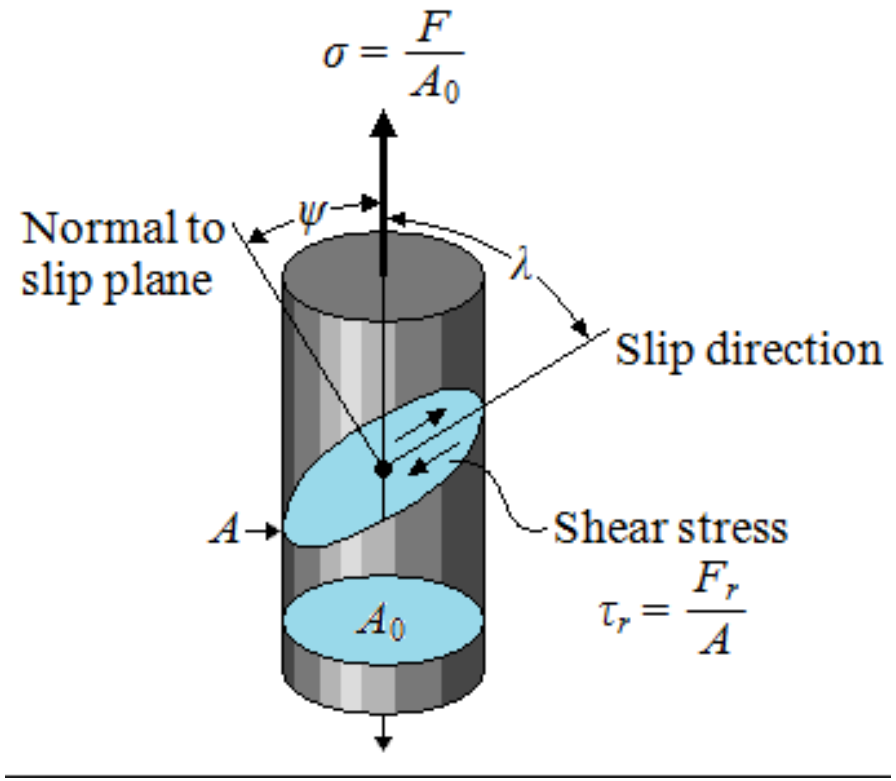
ถ้าออกแรงขนานตามรูป ลูกบอลจะเคลื่อนตามแนวแรงหรือไม่ ?

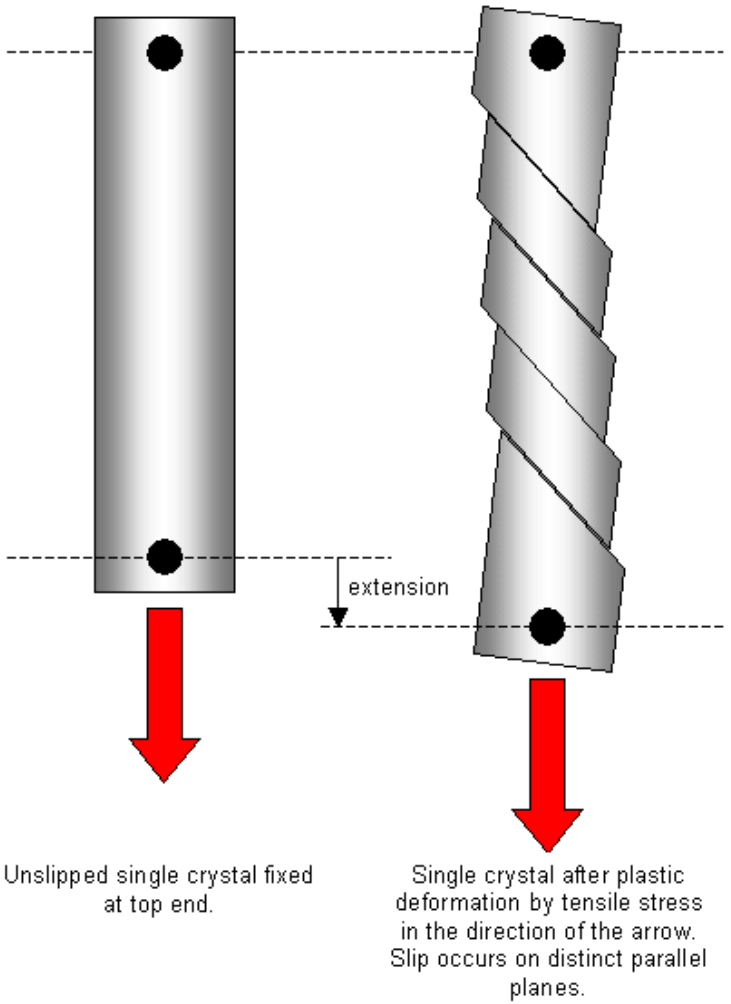




https://www.continuummechanics.org/metalplasticity.html

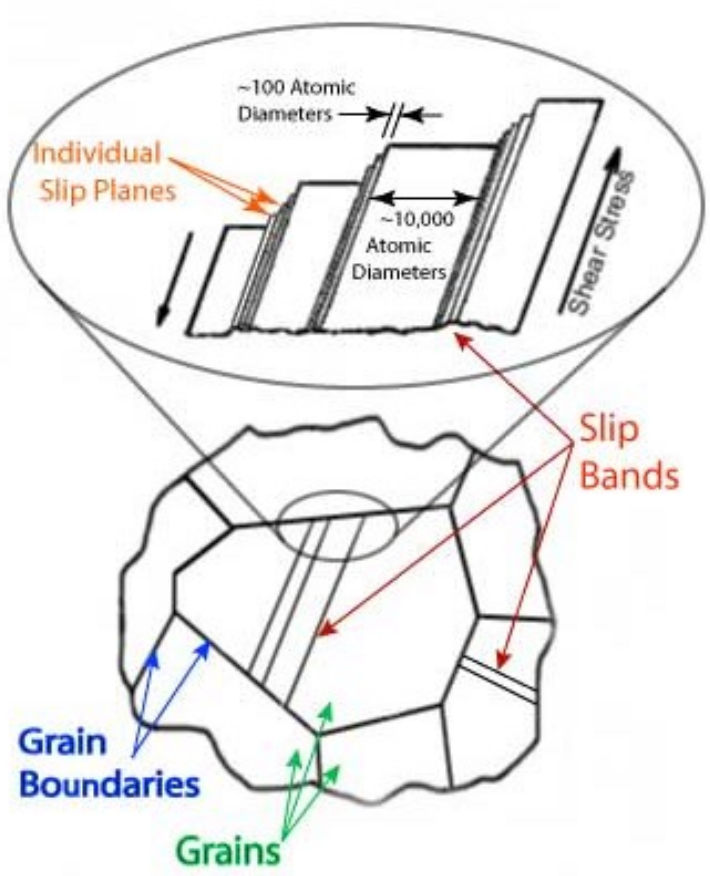
Critical Resolved Shear Stress





https://www.engineeringarchives.com/les_matsci_schmidslaw.html

Slip Bands and Slip Lines

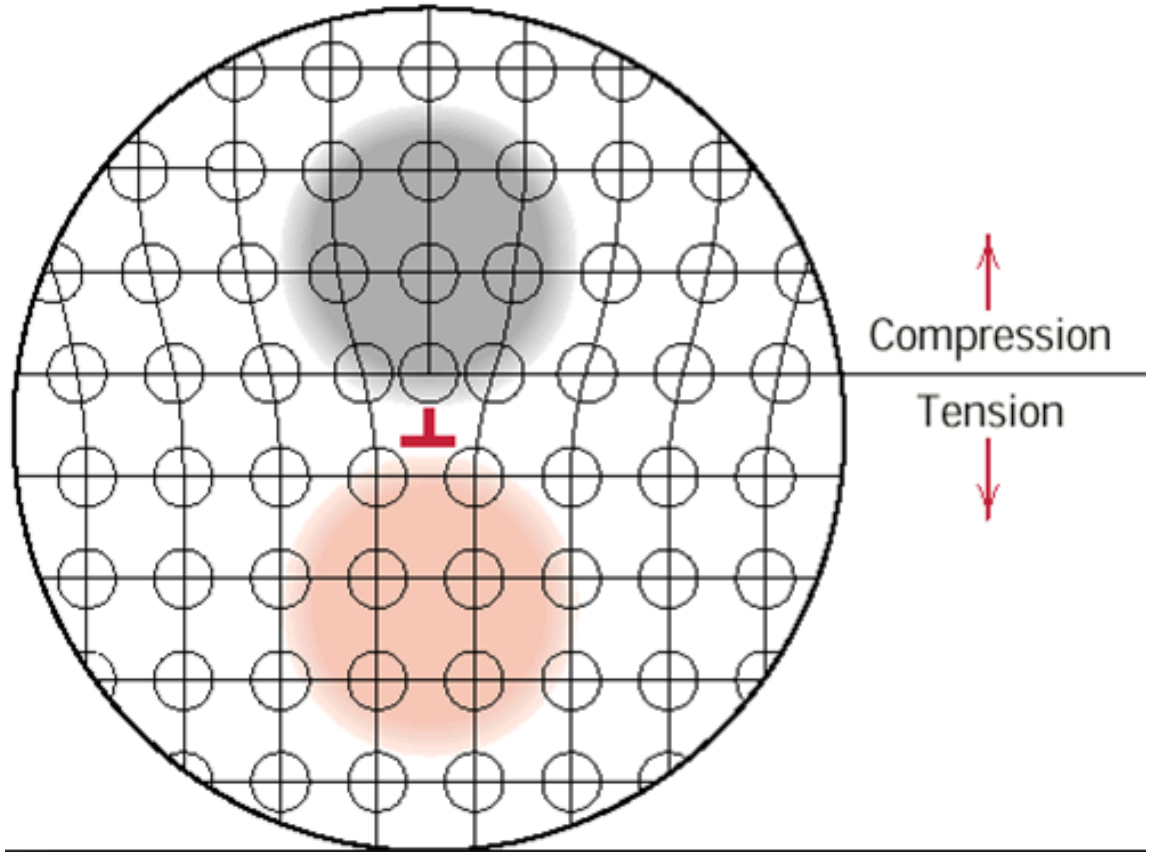


https://www.nde-ed.org/Physics/Materials/Structure/deformation.xhtml

Slip !!!!

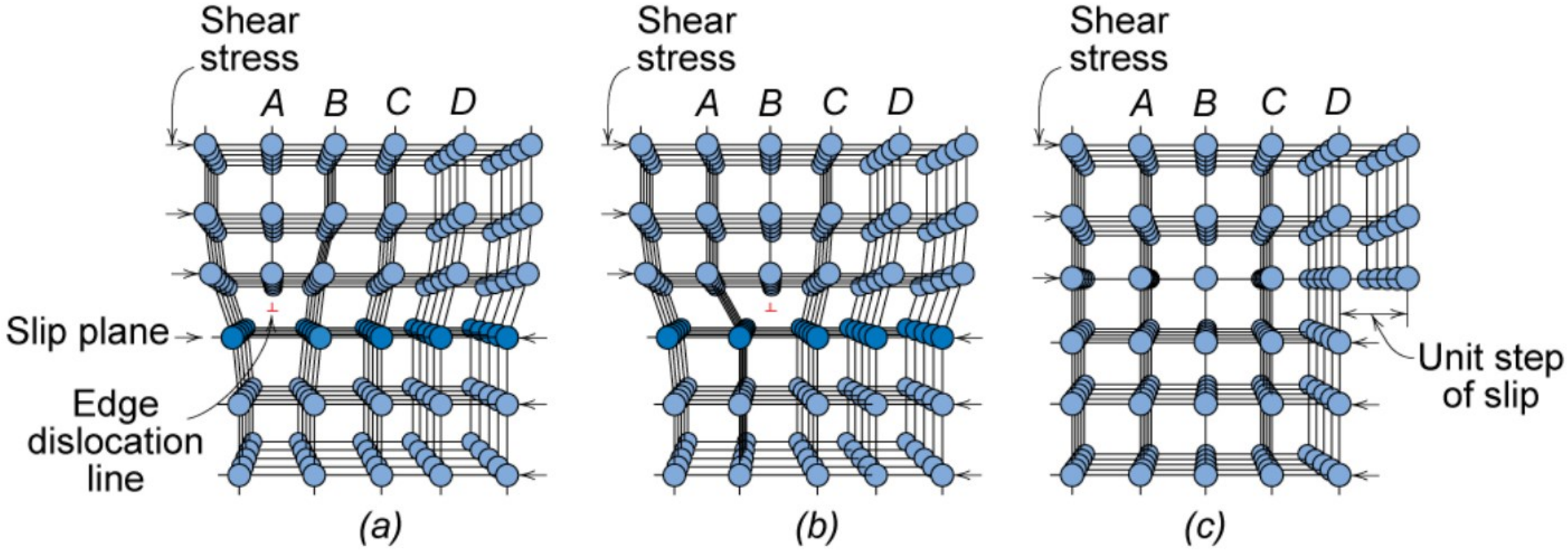
- อะตอมตัดขาดทุกพันธะพร้อมๆกันหรือไม่?
- แรงที่ทำให้เกิดการสลิปน้อยกว่าที่คำนวณไว้มาก
- X-rays ขณะเกิดการสลิปเจอจุด ขาว-ดำ มันเลื่อน

ความเครียดของดิสโลเคชั่น



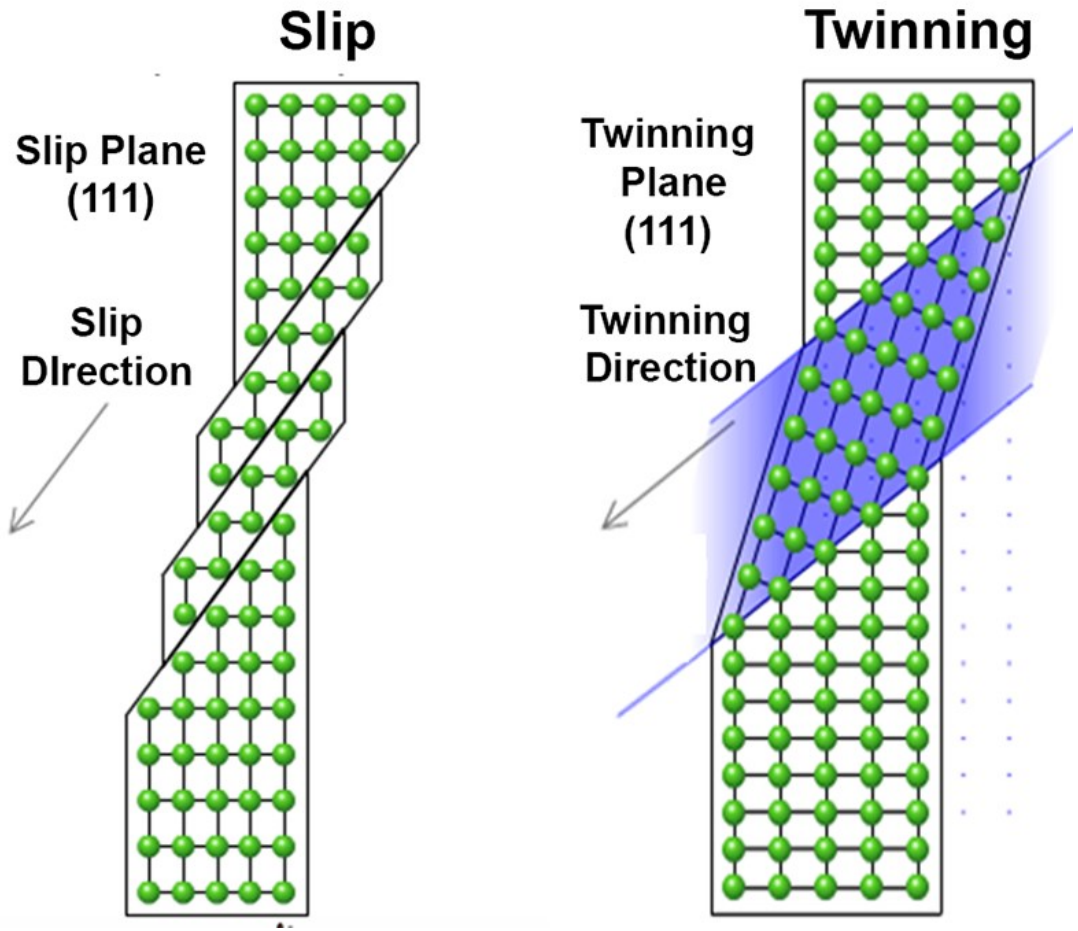
http://courses.washington.edu/mse170/lecture_notes/RinaldiF09/Lecture11-MR2009.pdf

แบบจำลองการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชั่น



http://courses.washington.edu/mse170/lecture_notes/RinaldiF09/Lecture11-MR2009.pdf

กลไกการแปรรูปแบบถาวร



https://link.springer.com/article/10.1007/s40830-018-00195-1

สรุป

- เกรนของโลหะถูกแปรรูปเนื่องจาก**เกิดการสลิป** เป็นกลไกหลัก
- การสลิปเกิดจาก **การเคลื่อนที่ของดิสโลเคชั่น**
- การเคลื่อนที่ของดิสโลเคชั่นต้องประกอบด้วย แรงและ Slip systems
- Slip system ประกอบด้วย ระนาบ และ ทิศทาง

- Twinning เป็นอีกกลไก ในการแปรรูปแบบถาวร
- Twinning เป็นกลไกที่มักเกิดที่อุณหภูมิต่ำ

3.กลไกการเพิ่มความแข็งแรง

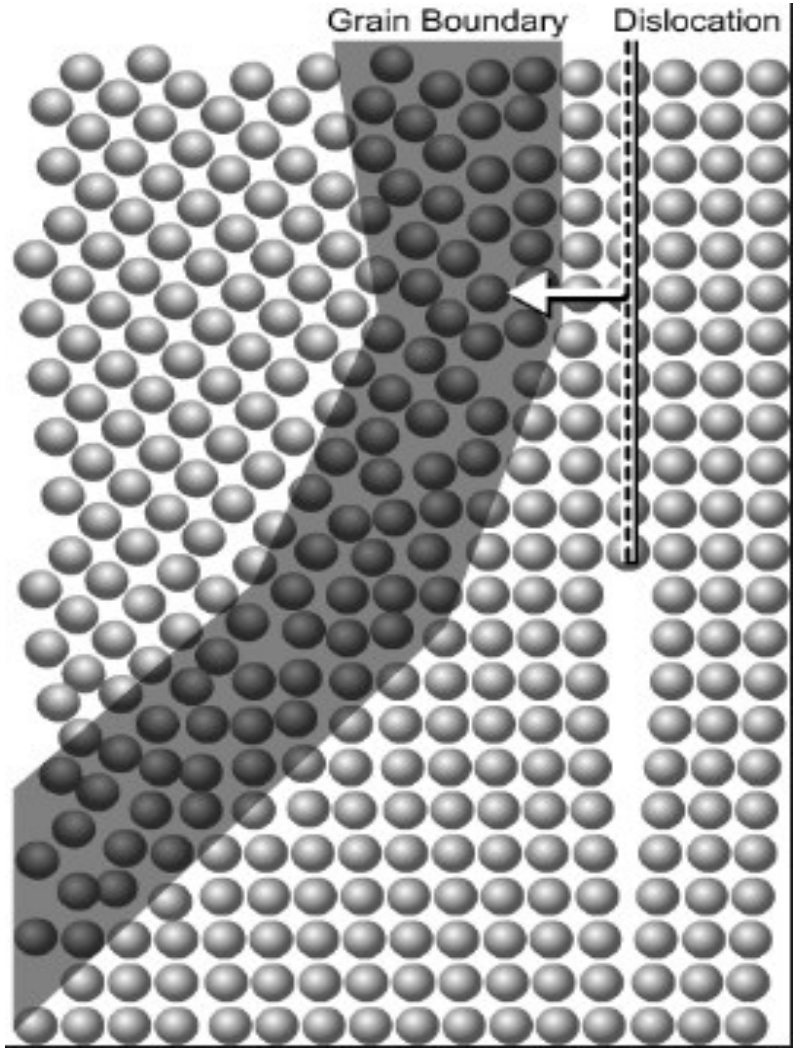
หลักการ คือ ?

- ***ยับยั้งการเคลื่อนที่ของ Dislocation***

กลไกที่เพิ่มความแข็งแรง

- Grain Size Refinement (Grain Boundary)
- Alloying
  - Solution Hardening
  - Precipitation Hardening
- Phase Transformation
- Work Hardening (Strain Hardening)

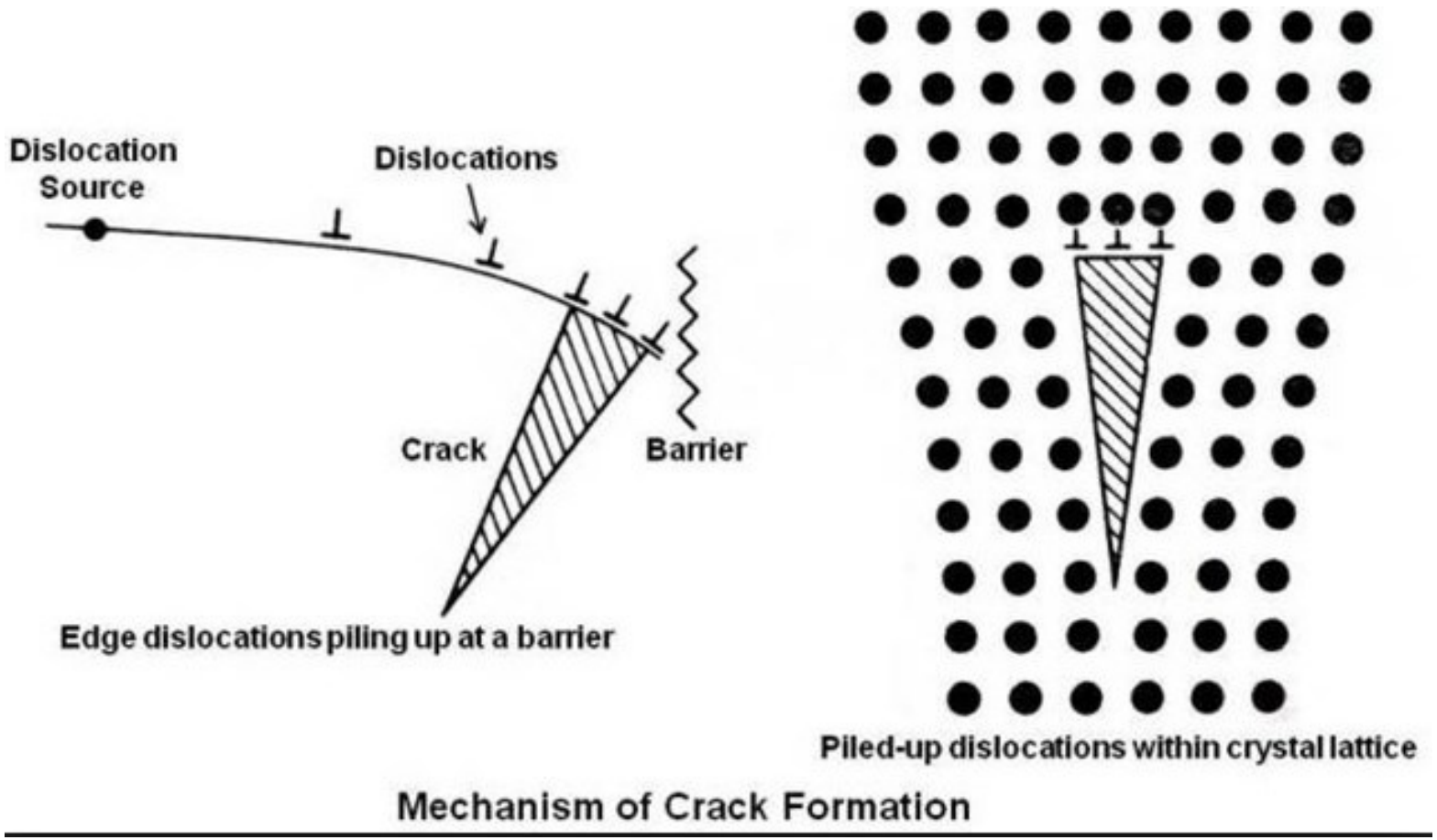
ดิสโลเคชั่นเคลื่อนที่ข้ามขอบเกรนได้หรือไม่ ?



เพราะเหตุใด ชิ้นงานจึงมีโอกาสแตกเมื่อขึ้นรูปเย็น ?

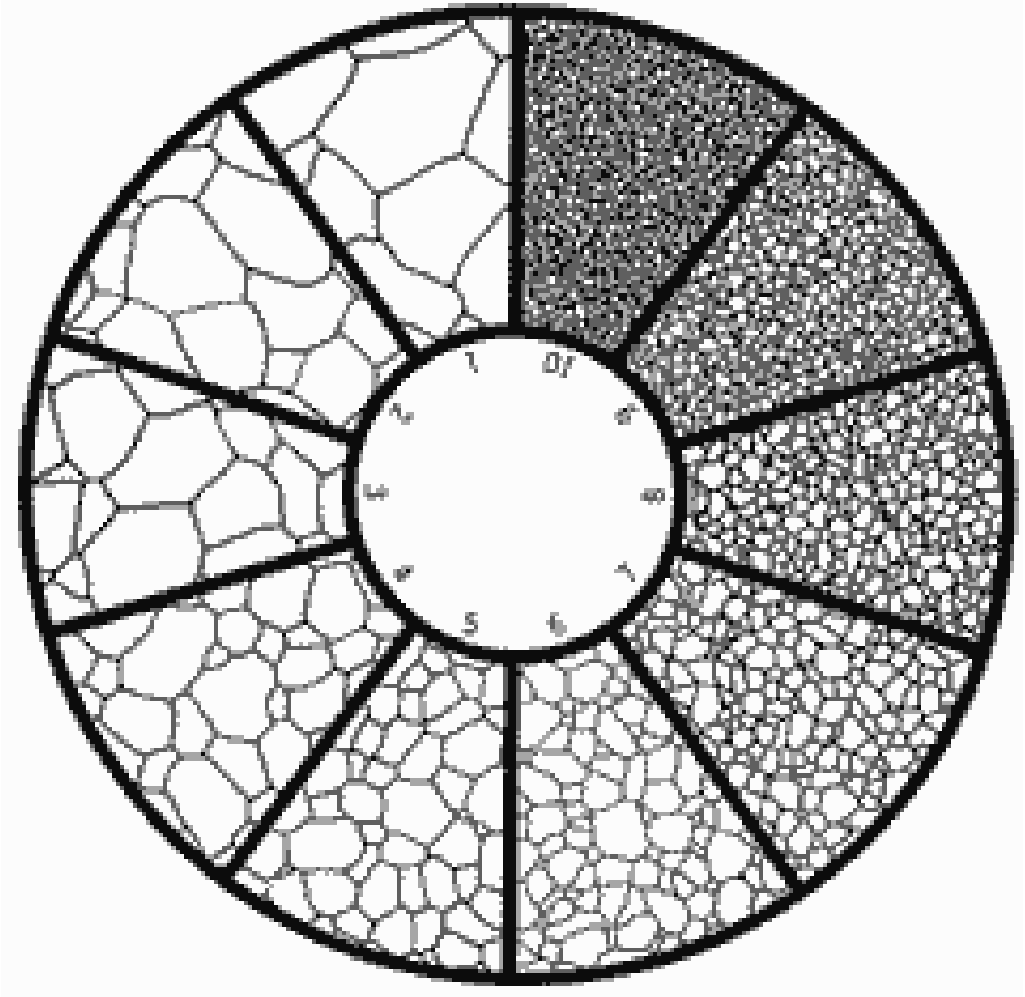
http://courseware.cutm.ac.in/wp-content/uploads/2020/06/S5-Perfect-and-real-crystals-converted.pdf

กลไกการแตก micro void



https://practicalmaintenance.net/?p=1135

เกรนเล็ก กับ เกรนโต อะไรดีกว่ากัน?

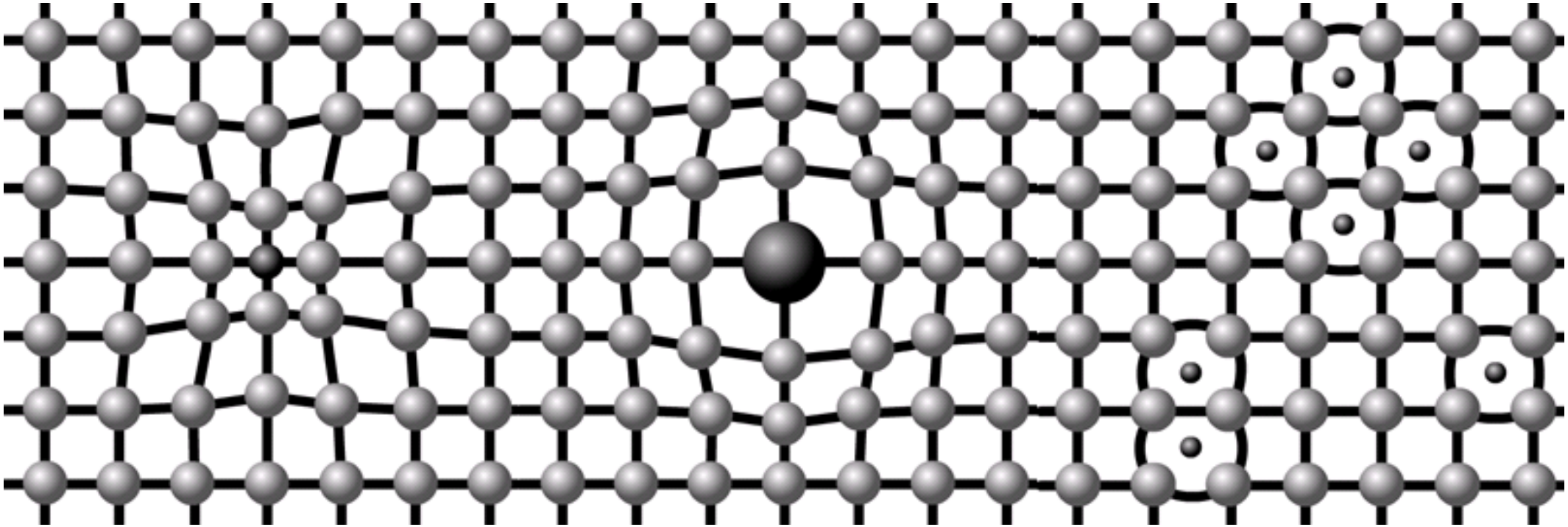


https://pmpaspeakingofprecision.com/2010/06/15/5-engineering-aspects-of-austenitic-grain-size/

Solution Hardening

- ทำให้ระนาบและทิศทางของผลึกบิดเบี้ยว
- มีความเครียดสะสมเพิ่มขึ้น
- ดิสโลเคชั่นเคลื่อนที่ยากขึ้น การสลิปก็เกิดได้ยาก
- การละลายแบบแทรก กับแบบแทนที่ แบบไหนมีผลต่อความแข็งมากกว่ากัน ?
- เช่น คาร์บอนในเหล็ก

Solution Hardening

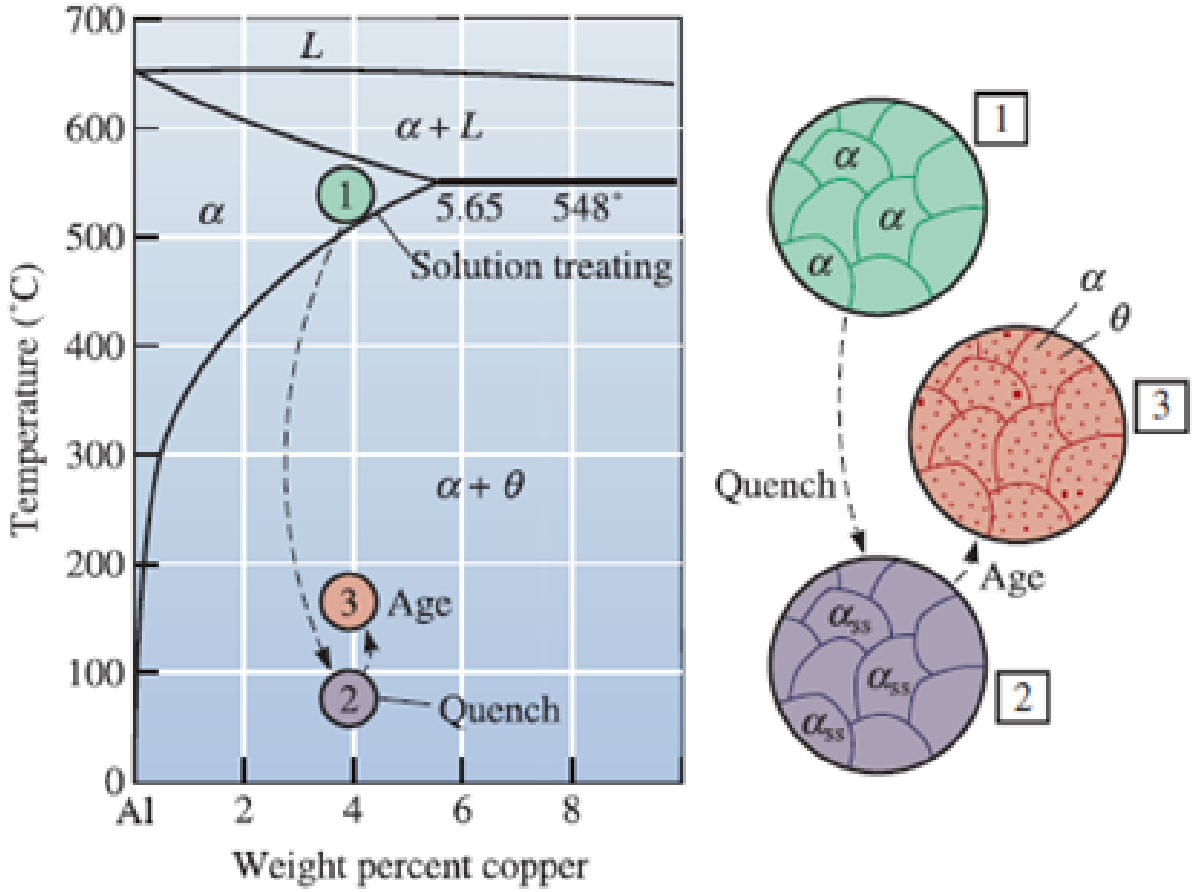


https://www.eng.uc.edu/~beaucag/Classes/Properties%20of%20Materials/Slides/Slides4.pdf

Precipitation Hardening

- คือ การทำให้อนุภาคขนาดเล็กตกผลึกกระจายอยู่ทั่วทั้งชิ้นงาน
- โดยหลักในการตกผลึก เฟสไดอะแกรมต้องมีลักษณะอย่างไร ?

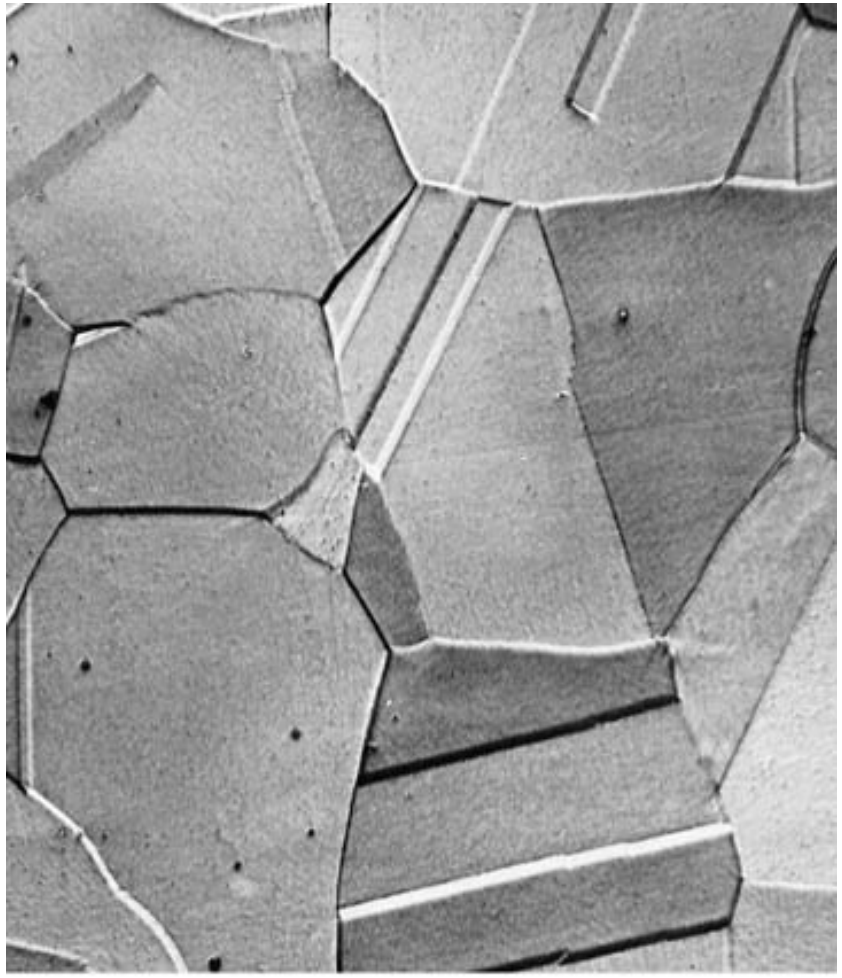
เฟสไดอะแกรมที่เหมาะในการตกผลึก



https://in.pinterest.com/pin/529595237410229789/

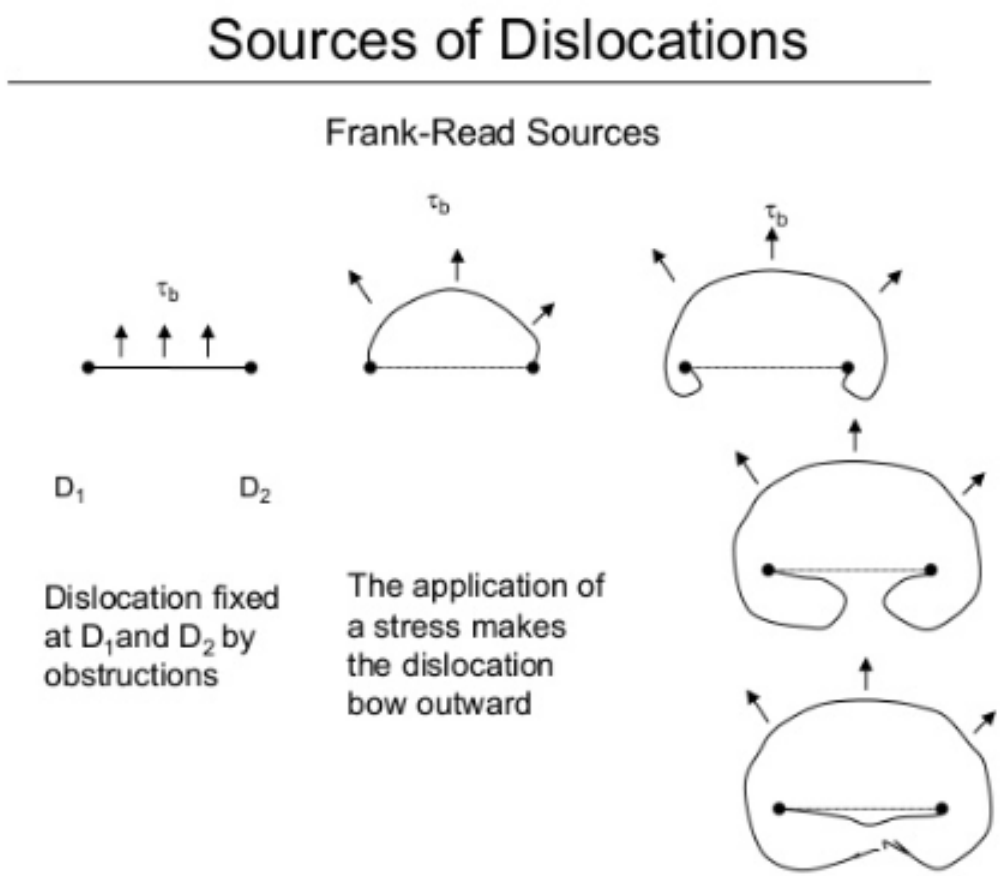
Phase Transformation Hardening

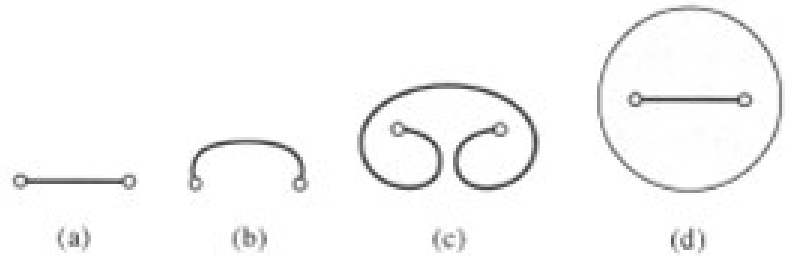
Austenite

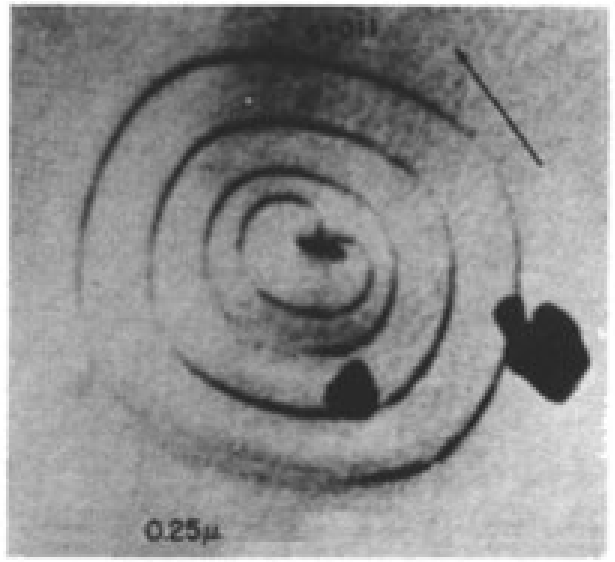


Martensite

Work Hardening



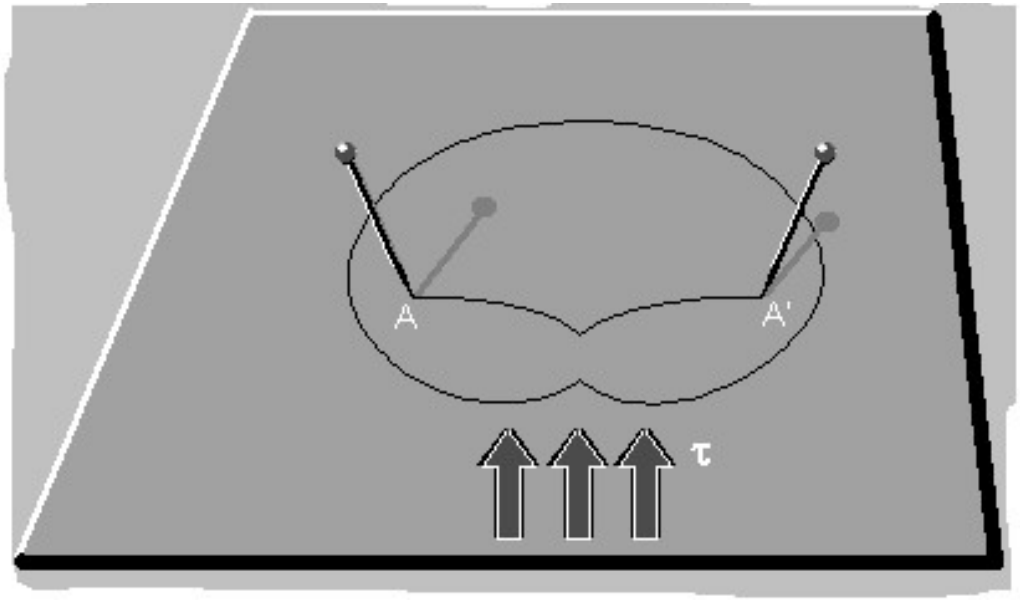


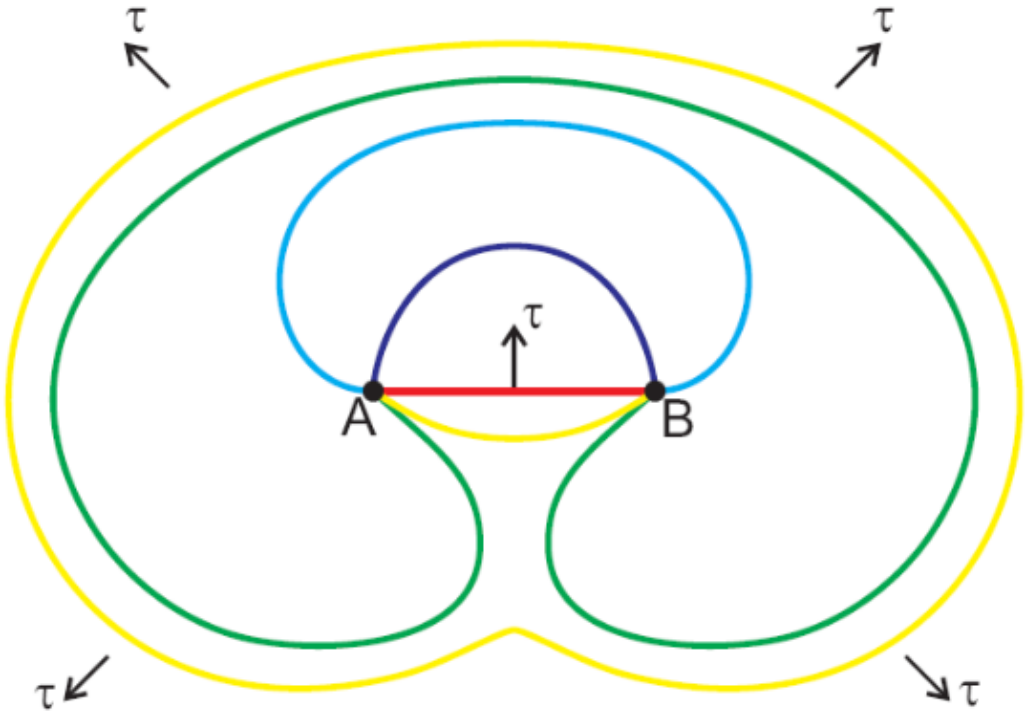


Formation of dislocations by a Frank-Read source, a-d: Schematic, e: Transmission electron microscopy image

J. Brittain, Met. Trans. 6A, 1975)

Pinning Effect



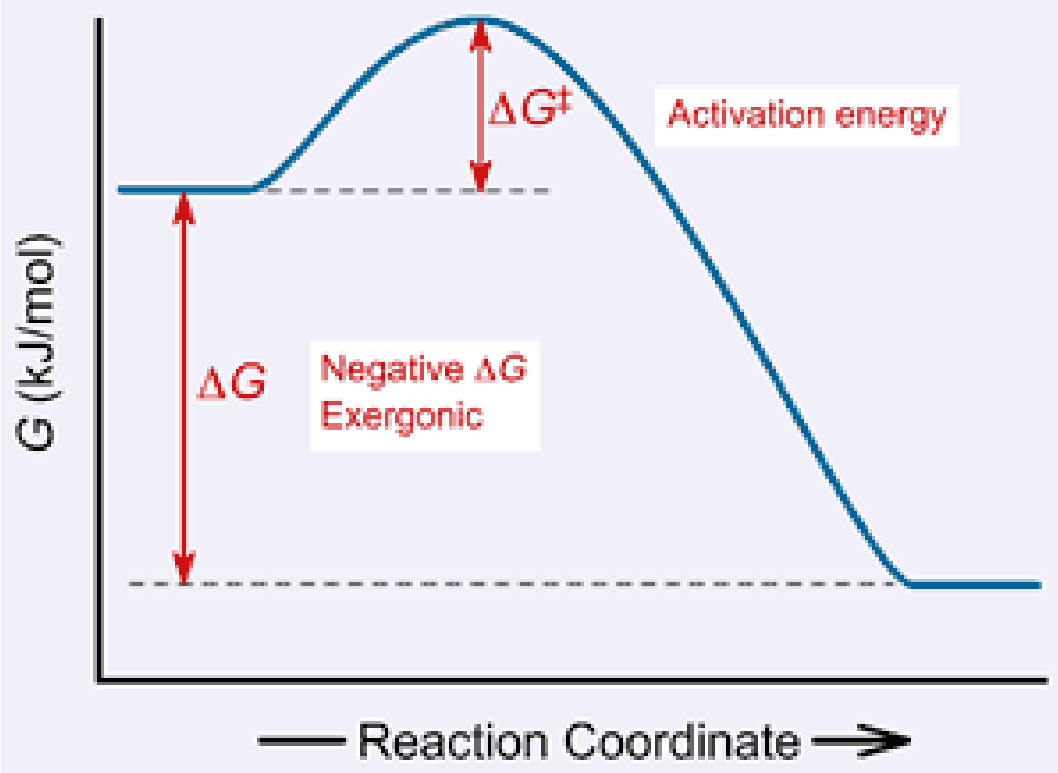


https://en.wikipedia.org/wiki/Frank%E2%80%93Read_source

- ถ้าต้องการนำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปเย็นไปใช้งาน โดยไม่ให้แตกหักง่าย ต้องทำอย่างไร เพราะอะไร ?

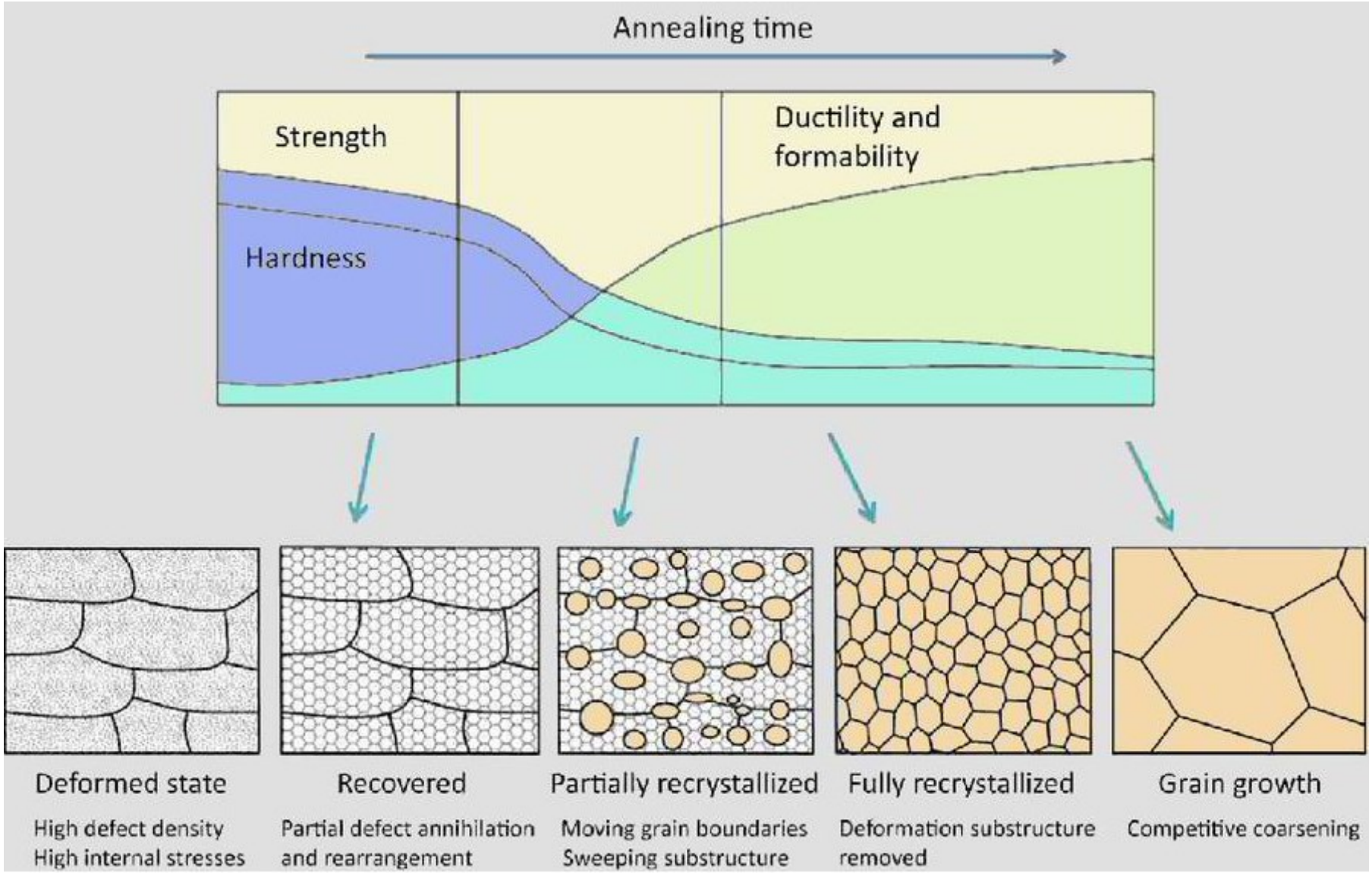
4.การอบอ่อน (Annealing)

- เป็นการลดความแข็งโดยเฉพาะงานที่ผ่านการขึ้นรูปเย็นมา โดยการให้ความร้อน
- หลักการคือ ต้องการลดระดับพลังงานความเครียดสะสมในโครงสร้างลง
- มี 3 ขั้นตอน คือ
  1. Recovery
  2. Recrystallization
  3. Grain Growth

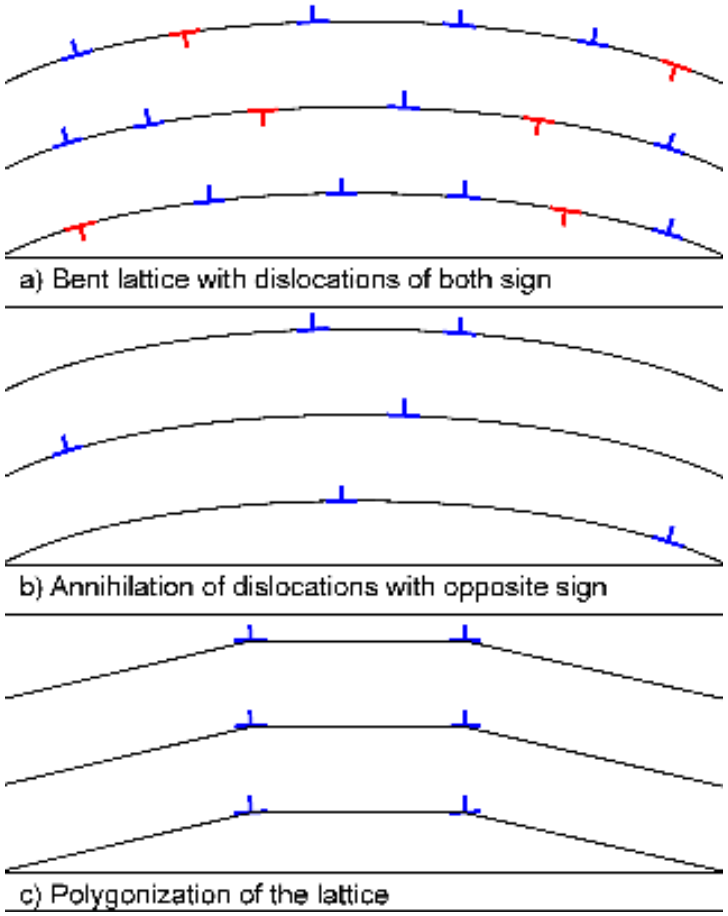


https://sceweb.sce.uhcl.edu/wang/biochem/thermodynamics/4_gibbs.html

Annealing


Annealing time
Strength
Hardness
Ductility and formability
Deformed state
High defect density
High internal stresses
Recovered
Partial defect annihilation and rearrangement
Partially recrystallized
Moving grain boundaries
Sweeping substructure
Fully recrystallized
Deformation substructure removed
Grain growth
Competitive coarsening

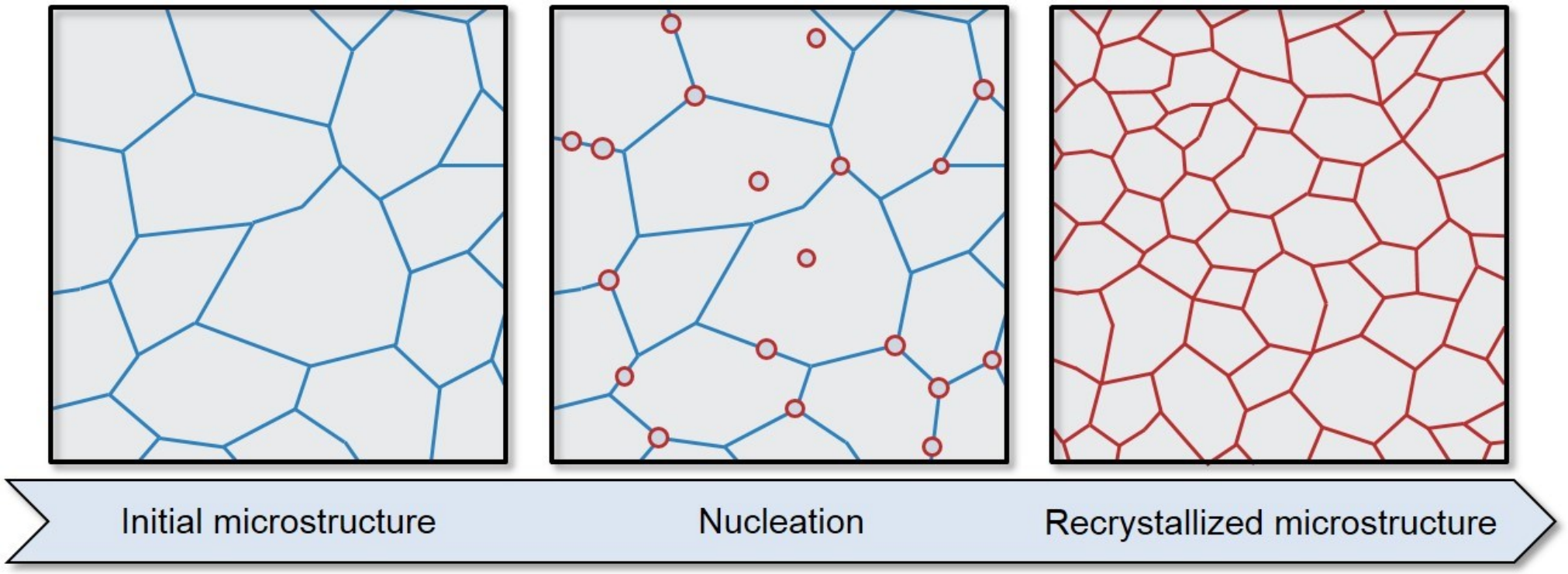
Recovery ลดพลังงานจากที่ใด ?



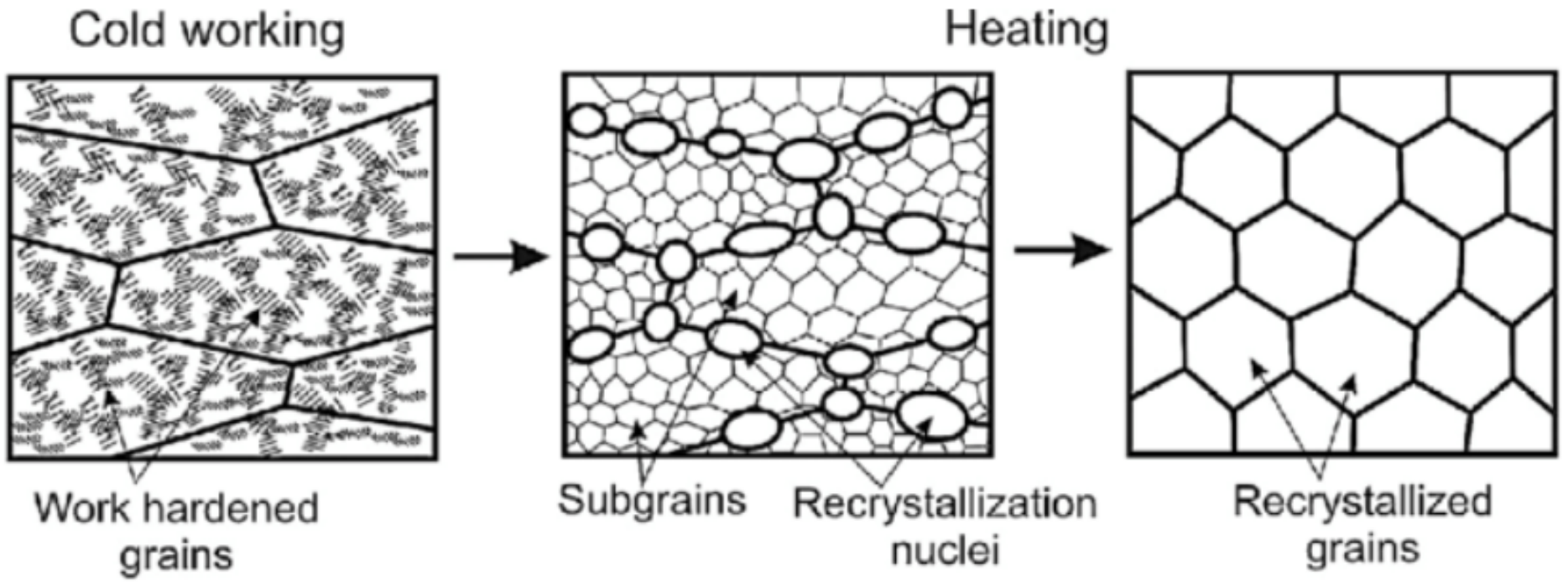
https://www.linkedin.com/pulse/recovery-recrystallization-cold-worked-materials-gifty-francis

Recrystallization

ลดพลังงานจากที่ใด ?



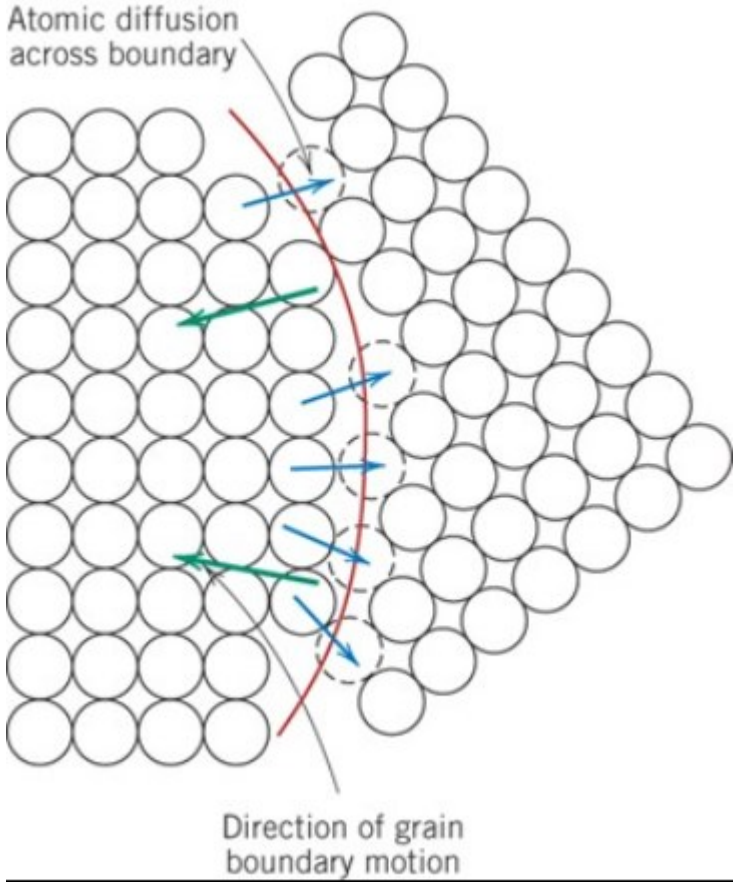
Recrystallization

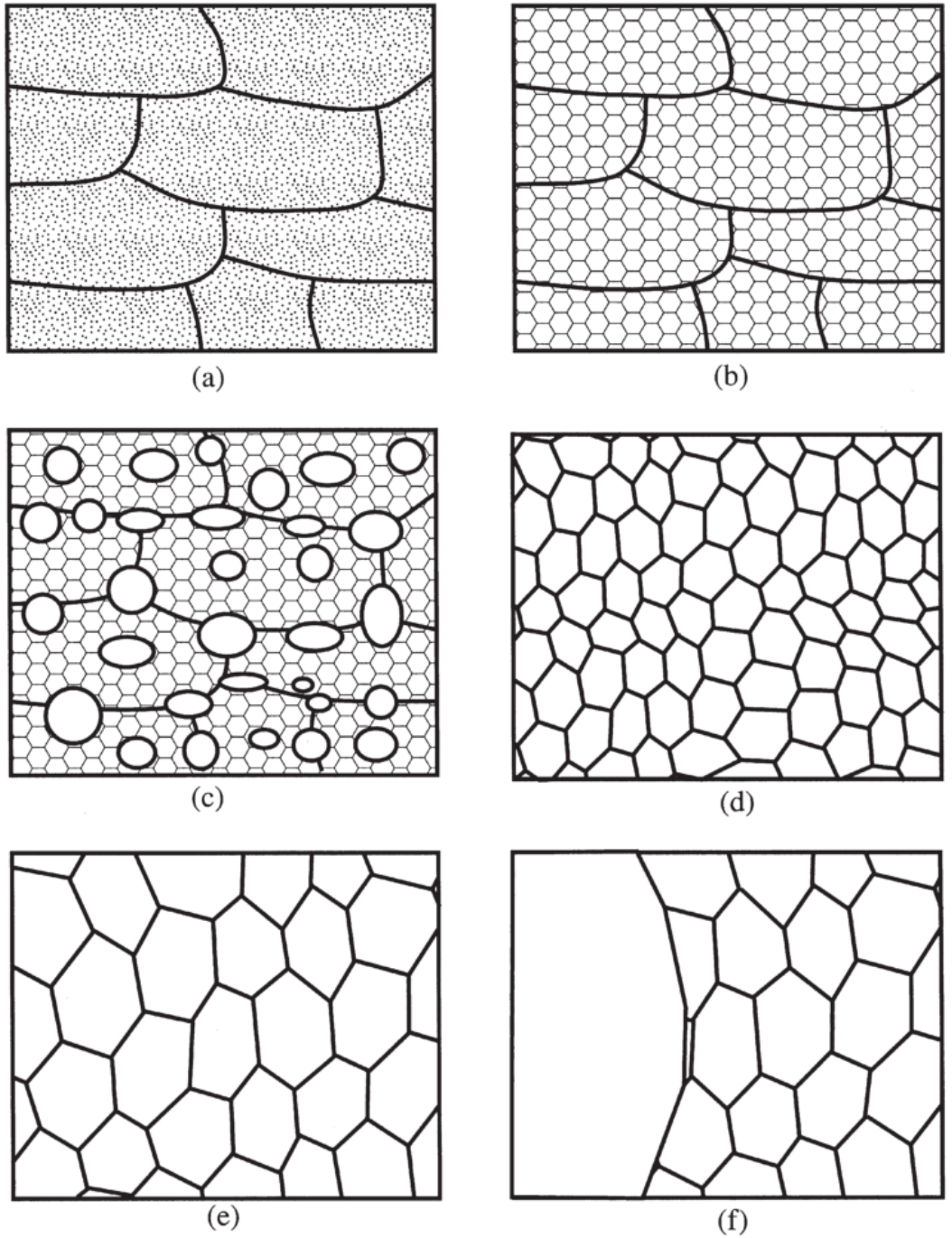


https://www.researchgate.net/figure/Schematic-representation-of-the-discontinuous-static-recrystallization-dSRX-taking_fig1_259095501

Grain Growth

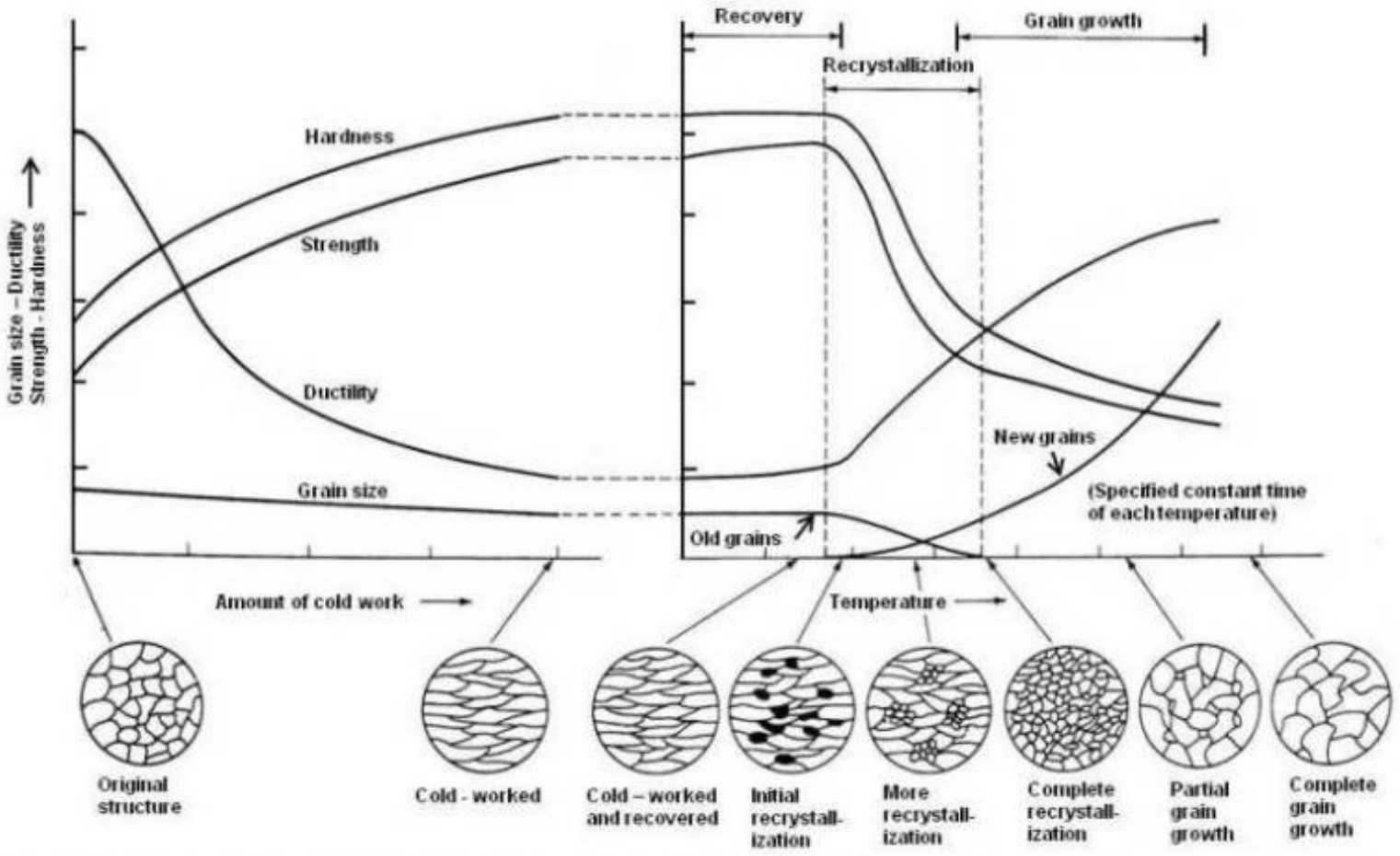
ลดพลังงานจากที่ใด ?





https://www.researchgate.net/figure/Main-annealing-processes-a-deformed-state-b-recovery-c-nucleation-of-new-grains_fig8_322291448

สรุปการเปลี่ยนโครงสร้างและสมบัติทางกล



Schematic Representation of the Cold-worked and Anneal Cycle showing the effects on Properties and Microstructure

5.การขึ้นรูปร้อน

- เมื่อให้ความร้อนและขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง ทำไมชิ้นงานจึงแตกยากขึ้น และใช้แรงน้อยลง กลไกที่เกิดขึ้นคือ ?

การขึ้นรูปร้อน ต่างกับการขึ้นรูปเย็นอย่างไร ?

- **อุณหภูมิต้องสูงเท่าไหร่ จึงเรียกว่า ขึ้นรูปร้อน ?**

- **การขึ้นรูปร้อน** คือ การขึ้นรูปภายใต้สภาวะที่มีอุณหภูมิและพลังงานความเครียดที่ทำให้*เกิดกระบวนการคลายพลังงานความเครียดไปพร้อมกันขณะขึ้นรูป*

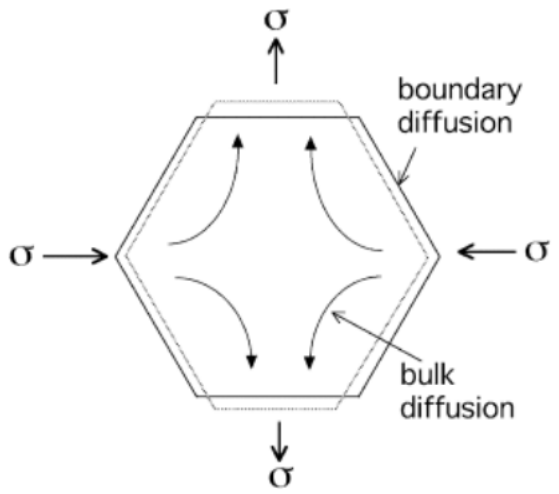
  - เกิดกระบวนการ Dynamic recovery หรือ Dynamic recrystallization ขึ้นกับชนิดของวัสดุ

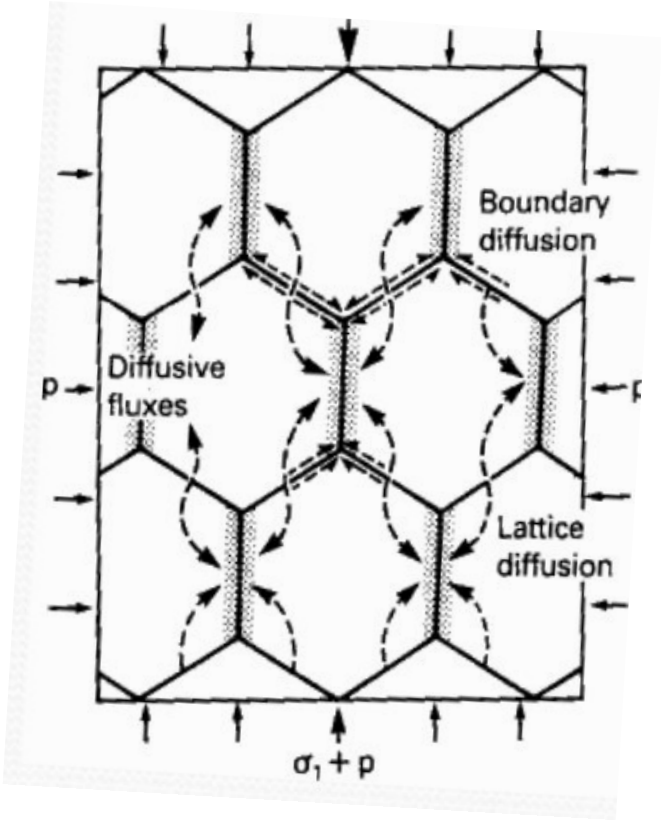
กลไกการขึ้นรูปร้อน

- เมื่ออุณหภูมิสูง อะตอมจะสั่นแรงขึ้นและเกิดช่องว่าง (Vacancies) ขึ้นมากมาย
- กลไกการเปลี่ยนรูปจึงซับซ้อน ขึ้นกับทั้งขนาดแรง อัตราการให้แรง พร้อมๆกับอุณหภูมิขณะนั้น

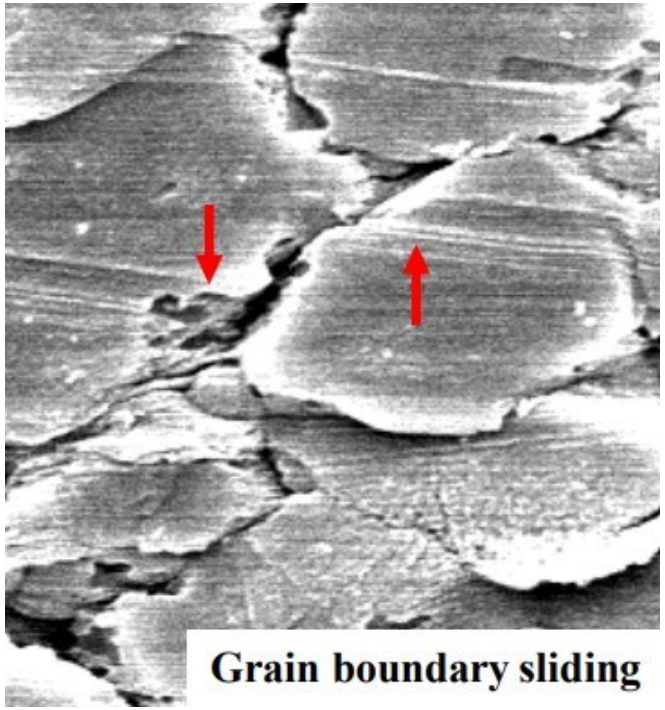
  - Dislocation glide ความร้อนกระตุ้นการเคลื่อนที่เพื่อเอาขนะตัวขวางตาม slip plane
  - Dislocation creep ความร้อนช่วยให้เกิดช่องว่างมากขึ้น เกิดการแพร่ของอะตอมได้ง่าย ดิสโลเคชั่นจึงเคลื่อนได้ง่ายขึ้น
  - Diffusion creep อะตอมเกิดการแพร่ไปตามแนวแรงดึง
  - Grain boundary sliding เกิดการเคลื่อนตัวของเกรน

กลไกการขึ้นรูปร้อน





Diffusion creep



http://courseware.cutm.ac.in/wp-content/uploads/2020/06/S5-Perfect-and-real-crystals-converted.pdf