

กลไกความแข็งแรงในโลหะ
Strengthening Mechanisms in Metals

กัณวริช พลุประชญ์¹

Ing. Ganwarich Pluphrach , Ph.D.

บทคัดย่อ

เนื่องด้วยโลหะมีความสามารถที่จะเปลี่ยนรูปได้ง่าย จึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของผลึกอะตอมที่ผิดปกติตามหากจำกัดการเคลื่อนที่นั้นได้ ก็จะเป็นการเพิ่มความแข็งและความแข็งแรง การลดขนาดเกรนทำให้เกิดการเพิ่มจำนวนของขอบเกรน ผลึกอะตอมที่ผิดปกติทั้งหลาย มักมีการเคลื่อนที่ในช่วงสั้นๆก่อนการปะทะกับขอบเกรน ทำให้โลหะนั้นแข็งแรงเพิ่มขึ้น ในการเพิ่มธาตุผสมของโลหะ ความแข็งและความแข็งแรงที่เกิดโดยสารละลายแข็ง เป็นแบบฉบับของการลดความสามารถในการเปลี่ยนรูปง่ายและการนำไฟฟ้า แต่ให้สมบัติความเป็นโลหะผสมอุณหภูมิสูงที่ดี เมื่อโลหะถูกทำให้เปลี่ยนรูป ความหนาแน่นของผลึกอะตอมที่ผิดปกติมีมากขึ้น เกิดการขยายขอบเขตการเคลื่อนที่ของผลึกนั้นต่อปฏิกิริยาความตึงเครียด ความแข็งแรงที่เกิดโดยความตึงเครียดเป็นส่วนที่ทำให้เกิดได้สูง ทั้งนี้โดยการเพิ่มจำนวนของการเปลี่ยนรูปนั่นเอง

ABSTRACT

Since the ease with which a metal is capable of plastic deformation is a function of dislocation mobility , restricting dislocation motion increases hardness and strength .By reducing the grain size , the number of grains are increased and , hence , increase the amount of grain boundary. Any dislocation moves only a short distance before encountering a grain boundary, and the strength of the metal is increased. In addition of alloying elements to increasing hardness and strength, solid solution strengthening typically decreases ductility and electrical conductivity but provides good high temperature properties to the alloy. When a metal is plastically deformed , the dislocation density increases, as does also the extent of repulsive dislocation – dislocation strain field interactions ; strain hardening is just the enhancement of strength with increased plastic deformation.

¹ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์ นครนายก 26120

Asst.Prof., Dept. of Mech. Eng., Faculty of Eng., SWU. Ongkharag Nakhon-nayok 26120

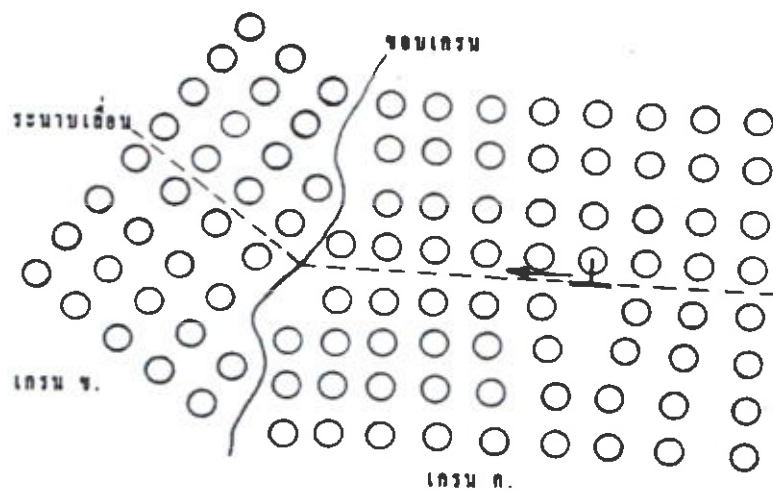
*Corresponding author , e-mail : pganwarich@yahoo.com

1. บทนำ (Introduction)

ความต้องการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ใช้วัสดุโลหะผสม (Alloys) คือส่วนประกอบหลักที่สำคัญในความสำเร็จของวิศวกรผู้ออกแบบ แนวคิดหลักในการออกแบบก็เพื่อต้องการให้ได้โลหะที่ใช้นั้น มีความแข็งแรงสูง(High strengths) ความเหนียว (Toughness) และความสามารถในการเปลี่ยนรูปได้ง่าย (Ductility) เนื่องจากความอ่อนตัวกับความแข็งแรง มักเป็นสิ่งที่สวนทางกัน กล่าวคือเมื่อโลหะผสมถูกปรับปรุงให้มีความแข็งแรงมากขึ้น ความอ่อนตัวก็มักจะลดน้อยถอยลงไปตามสัดส่วน ถ้าต้องการที่จะให้โลหะผสมมีสมบัติทางกลเฉพาะด้าน สิ่งที่สำคัญมากก็คือผู้ออกแบบ จะต้องมีความสามารถในการเลือกใช้งานโลหะผสม ให้เหมาะต่อการใช้งานเฉพาะนั้นๆ และต้องเข้าใจกลไกที่จะทำให้เกิดความแข็งแรงอีกด้วย[5] นั่นคือต้องเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรมทางกล และการตกผลึกที่ผิดปกติของอะตอม(Dislocation) การเคลื่อนตัวต่อการตกผลึกดังกล่าวนี้ มีความสอดคล้องต่อการเปลี่ยนรูป(Plastic deformation)ของโลหะนั้น ซึ่งเป็นปัจจัยที่แสดงความสามารถต่อกันทั้งสองได้เป็นอย่างดี สมบัติทางกลอันเนื่องมาจากความแข็ง(Hardness) และความแข็งแรงทั้งจุด Yield ,Tensile มักจะมีความสัมพันธ์กันที่ง่ายต่อการเกิดการเปลี่ยนรูป ดังนั้นเมื่อโลหะผสมใดมีความแข็งแรงมากกว่า จึงต้องใช้แรงกระทำสูงกว่า เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนรูปตามความต้องการนั้น ขณะเดียวกันการเปลี่ยนรูป หากไม่มีการเคลื่อนที่ของอะตอมตกผลึกแบบผิดปกติแล้ว ดูเหมือนว่าความแข็งแรงก็จะถูกทอนให้ลดน้อยถอยลงตามลำดับอีกด้วย แท้จริงแล้ววิธีการใดๆที่ทำให้เกิดสมบัติทางกล ที่ดีกว่าได้นั้น ย่อมขึ้นอยู่กับหลักการเบื้องต้น ของข้อจำกัดหรืออุปสรรคการเคลื่อนที่ต่ออะตอมตกผลึกดังกล่าว ที่สนองตอบให้โลหะดีกว่าในรูปของความแข็งและความแข็งแรง[1]

2. ความแข็งแรงที่เกิดโดยขนาดเกรน (Grain size strengthening)

ค่าเฉลี่ยขนาดเกรนมีอิทธิพลต่อสมบัติทางกลของโลหะ เกรนที่อยู่ประชิดกันโดยปกติแล้ว อาจมีทิศทางของผลึกที่แตกต่างกันได้ ลักษณะที่แตกต่างกันนี้เป็นเหตุให้เกิดขอบเกรน (Grain boundary) ดังรูปที่ 1 [8]



└ หมายถึงการตกผลึกที่ผิดปกติของอะตอม

รูปที่ 1 แสดงการเคลื่อนตัวของอะตอมตกผลึกที่ผิดปกติ มักเคลื่อนที่ตามแนวระนาบเลื่อน (Slip plane)

ในระหว่างการ โดยไปสุดที่ขอบเกรนระนาบเลื่อนมีการเปลี่ยนทิศเมื่อข้ามขอบเกรนเปลี่ยนรูปของโลหะแนวเลื่อน (Slip) หรือการเคลื่อนตัวของอะตอมตามรูปที่ 1 เกิดการข้ามขอบเกรน ก. ไปสู่เกรน ข. ขอบเกรนดังกล่าวคือสิ่งที่ขวางกั้นต่อการเคลื่อนตัวของอะตอมด้วยเหตุผลดังนี้

- ก. เนื่องจากเกรนทั้งสองมีการพลิกแนวที่ต่างกัน เมื่ออะตอมตกผลึกผิดปกติทำให้เกิดการเคลื่อนตัวข้ามขอบเกรนไปสู่เกรน ข. เนื่องจากมีแรงกระทำต่อวัสดุจากภายนอก จึงทำให้ต้องเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่
- ข. ความไม่เป็นระเบียบของอะตอม ภายในบริเวณขอบเกรนส่งผลให้เกิดความไม่ต่อเนื่อง ของระนาบเลื่อนต่ออะตอมบริเวณนั้น

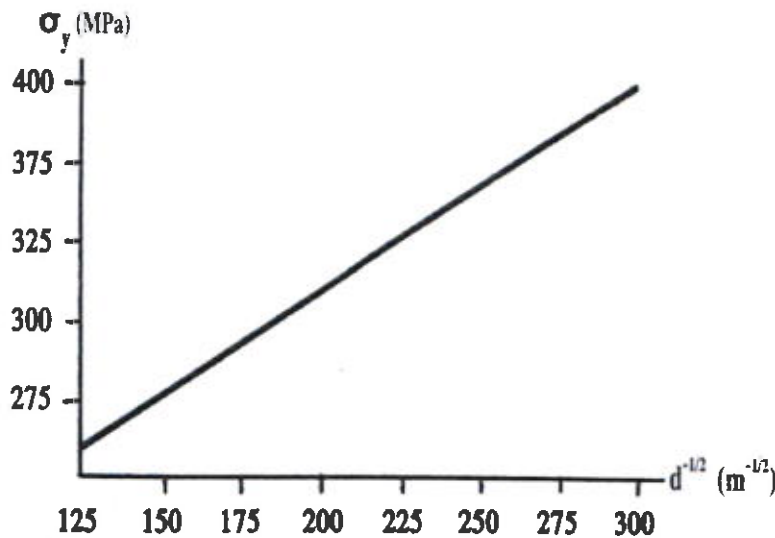
ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า ขอบเกรนที่มีมุมมากกว่า 90 องศา อาจไม่ทำให้การตกผลึกที่ผิดปกติของอะตอม เกิดเป็นลักษณะของการขวางขอบเกรน ในระหว่างการเปลี่ยนรูป ภายหลังจากตกผลึกนั้นมีการเปลี่ยนเป็นเสมือนสิ่งที่ยากองรวมกันของผลึก (Pile up) ต่อขอบเกรน ทำให้มีความเค้นสะสมเพิ่มมากขึ้นต่อแนวระนาบเลื่อน จึงก่อให้เกิดวัฏจักรของการตกผลึกที่กล่าวมาแล้วนั้นอีกครั้งหนึ่ง[4]

โลหะที่มีเกรนละเอียดมักจะมีความแข็งแรงมากกว่าโลหะที่มีเกรนหยาบ สามารถสังเกตได้จากการที่บริเวณขอบของเกรนที่เล็กกว่า มักมีพื้นที่ที่มากกว่าขอบของเกรนที่ใหญ่ ก่อให้เกิดแนวขวางการเคลื่อนที่ของการตกผลึกที่ผิดปกติของอะตอม จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปได้ยากกว่า เมื่อ

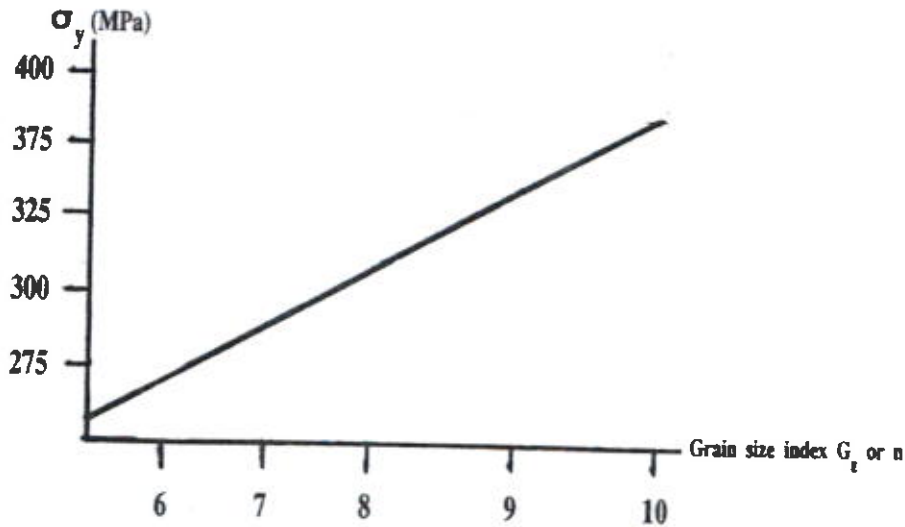
เทียบกับแรงกระทำที่เท่ากันต่อโลหะที่มีเกรนหยาบ ดังนั้นความต้านแรงดึงที่จุดคราก (Yield strength: σ_y) จึงผันแปรตามขนาดของเกรนดังสมการ [1]

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2} \text{ -----(1)}$$

สมการฮอลล์ - เพทช์ (Hall - Petch) ตามสมการ(1)มีความสัมพันธ์ต่อขนาดเกรนที่จุดครากตัวของความแข็งแรง โดยที่ σ_y คือความต้านแรงดึงหรือความเค้นแรงดึงที่จุดคราก ที่ซึ่งโลหะนั้นมีการเปลี่ยนรูปร่างถาวรแล้ว d คือค่าเฉลี่ยขนาดเกรน, และ σ_0 & k_y คือค่าคงที่สำหรับวัสดุจำเพาะ ตามสมการ(1)ใช้ได้กับโลหะที่มีเกรนค่อนข้างละเอียด รูปที่ 2 และ 3 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ของความเค้นแรงดึงที่จุดครากในเหล็กกล้า ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของเกรน[6] ขนาดเกรนอาจถูกควบคุมได้โดยการกำหนดอัตราของการแข็งตัว(Solidification) จากช่วงที่เป็นของเหลวของเหล็กกล้า หรือโดยการเปลี่ยนรูปร่างที่ตามด้วยการกระทำทางความร้อน(Heat treatment) อันเหมาะสมอีกด้วย ความเค้นแรงดึงที่จุดดังกล่าวเกี่ยวเนื่องถึงการลดขนาดเกรน ที่ไม่เพียงแต่จะปรับสภาพความแข็งแรงเพียงอย่างเดียวเท่านั้น หากแต่ยังครอบคลุมถึงความเหนียวของวัสดุโลหะผสมที่มีหลายประเภทอีกด้วย

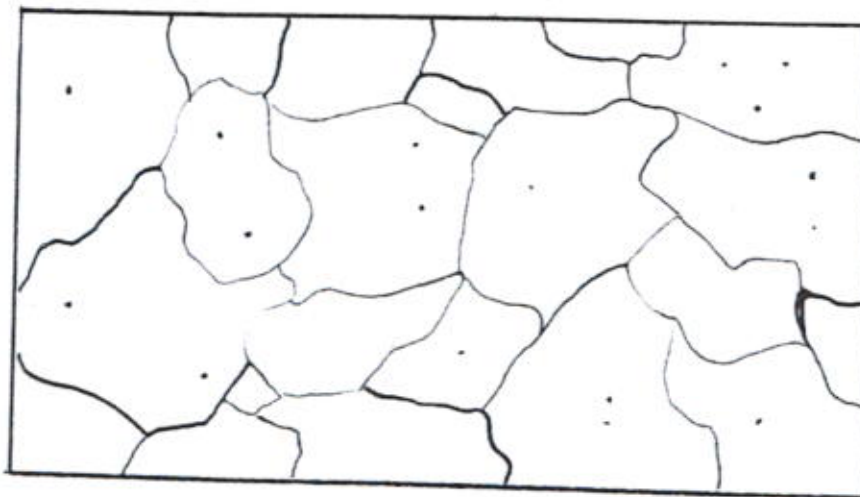


รูปที่ 2 แสดงผลของขนาดเกรนต่อความเค้นแรงดึงที่จุดคราก ของเหล็กกล้าที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 3 แสดงผลครรชนีขนาดเกรนต่อความเค้นแรงดึงที่จุดคราก ของเหล็กกล้าที่อุณหภูมิห้อง

กล้องจุลทรรศน์ใช้สำหรับคุณภาพโครงสร้างของโลหะเช่นขอบเกรน โดยมีกำลังขยายได้มากถึง 2,000 เท่า กระบวนการเตรียมชิ้นทดสอบเพื่อสังเกต และบันทึกภาพโครงสร้างใดๆ มักถูกเรียกว่า Metallography เมื่อชิ้นทดสอบถูกขัดหยาบและมันให้เงาดังกระจกแล้วก็นำผิวที่ได้ไปสู่อการกัดกรด ทำให้สามารถแสดงขอบเกรนให้ปรากฏขึ้น เนื่องจากกรดที่กัดนั้นมุ่งกระทำต่อขอบเกรนมากกว่าสารตกค้างภายในเกรน[9] แสงสว่างจากกล้องจุลทรรศน์จะถูกทำการสะท้อนภาพให้เห็น หรือถูกทำให้หักเหจากผิวหน้าของชิ้นทดสอบ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของผิวหน้าที่ถูกกัดด้วยกรดนั้น เมื่อแสงที่มากกว่าถูกหักเหจากลักษณะเฉพาะที่มีความลึก เช่นขอบเกรน ลักษณะเฉพาะนั้นจะปรากฏเป็นเงามืด ดังปรากฏตามรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงตัวอย่างเกรนและขอบเกรนของโครงสร้างจุลภาค

การกำหนดรายละเอียดเฉพาะของขนาดเกรน วิธีการหนึ่งโดยที่ขนาดเกรนถูกกำหนดเป็นตัวเลขหรือครรชนีขนาดเกรน ตามข้อกำหนดของ ASTM (American Society for Testing & Materials) และ BS (British Standards) ตัวเลขขนาดเกรน (n) ASTM ถูกกำหนดจากสูตร [2]

$$N = 2^{n-1} \text{-----(2)}$$

เมื่อ N คือ จำนวนเกรนต่อนิ้ว² ที่มีกำลังขยาย 100 เท่า

n คือ ตัวเลขขนาดเกรนตาม ASTM

ครรชนีขนาดเกรน G_E ตาม BS 4490 : 1989 กำหนดโดยใช้

$$m = 2^{(G_E+3)} \text{-----(3)}$$

เมื่อ m คือ จำนวนเกรนต่อมม.² ที่มีได้ใช้กำลังขยาย

G_E คือ ครรชนีขนาดเกรน

วัตถุประสงค์ในทางปฏิบัติทั่วไปแล้ว ตัวเลขขนาดเกรน (n) และครรชนีขนาดเกรนมีความคล้ายกัน ครรชนีขนาดเกรนที่ใหญ่มักเป็นตัวเลขชี้บอกเกรนหลายเกรน ส่วนขนาดเกรนเล็กสามารถเทียบเคียงได้กับความแข็งแรงสูง ในตารางที่ 1 คือรายละเอียดในส่วนของมาตรฐานขนาดเกรนที่ระบุไว้ และมีความสัมพันธ์กับเกรนที่สอดคล้องต่อกัน [2]

ตารางที่ 1 แสดงการกำหนดขนาดเกรนมาตรฐานตาม ASTM & BS

ครรชนีขนาดเกรน หรือตัวเลขขนาดเกรน (n)	เกรนเฉลี่ยต่อมม. ² มิได้ใช้กำลังขยาย	เกรนเฉลี่ยต่อนิ้ว ² กำลังขยาย 100 เท่า
0	8	0.5
1	16	1
2	32	2
3	64	4
4	128	8
5	256	16
6	512	32
7	1024	64
8	2048	128

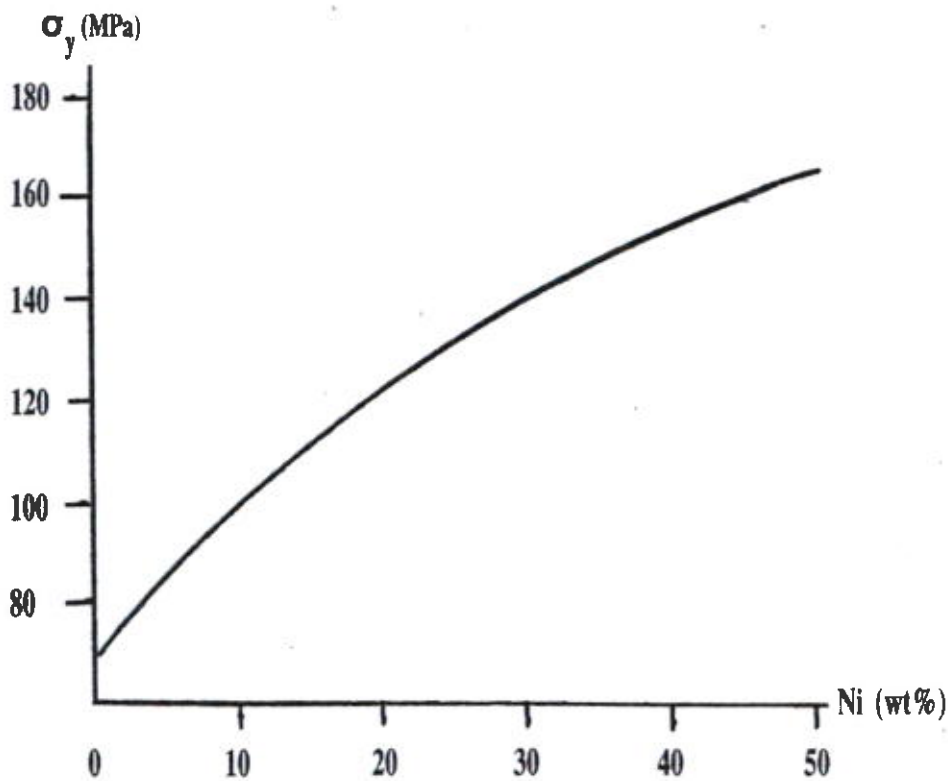
3. ความแข็งแรงที่เกิดโดยสารละลายแข็ง (Solid solution strengthening)

โดยที่การผลิตโลหะผสมตามวิธีการสารละลายแข็ง จะทำให้เกิดความแข็งแรงขึ้นได้นั้น จะต้องผสมสารมลทินเข้าไปในรูปของการแทนที่อะตอม (Substitutional) หรือการแทรกตัวของอะตอม (Interstitial) โลหะที่มีความบริสุทธิ์สูงเกือบทั้งหมด ย่อมมีแต่ความอ่อนแอกว่าโลหะผสมที่ประกอบจากฐานโลหะเดิม เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารมลทิน ยังผลให้โลหะผสมนั้นเพิ่มความแข็งแรงถึงสูงสุดและที่จุดคราก ในระบบสารละลายแข็งทองแดง-นิกเกิล นิกเกิลจะเป็นอะตอมแบบแทนที่เข้าสู่ผลึกตาข่าย (Lattice) แรกเริ่มของทองแดง โลหะผสมทองแดง-นิกเกิลมีความแข็งแรงกว่าทองแดงบริสุทธิ์ ในลักษณะที่คล้ายคลึงกันนี้ ถ้าหากผสมสังกะสี (Zn) น้อยกว่า 30 % ในทองแดง สังกะสีที่ผสมเข้าไปนั้น อะตอมของมันจะมีพฤติกรรมเป็นแบบการแทนที่ ที่มีความแข็งแรงในรูปแบบของโลหะผสมทองแดง-สังกะสี มากกว่าเมื่อเทียบกับทองแดงบริสุทธิ์ ระดับความแข็งแรงดังกล่าวนี้มีข้อพิจารณาอยู่ 2 ปัจจัย คือ

ก. ความแตกต่างของขนาดอะตอมระหว่างอะตอมแรกเริ่ม และอะตอมส่วนที่นำผสมเข้าไป ทำให้สามารถเพิ่มความแข็งแรงขึ้นได้ ความแตกต่างที่มากขึ้นของอะตอม จะทำให้ผลึกตาข่ายแรกเริ่มมีความเปลี่ยนแปลงมาก ยังผลให้เกิดแนวเลื่อนยากขึ้น

ข. จำนวนของธาตุผสมที่มาก มักทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ส่วนผสมของทองแดง-20%นิกเกิล มีความแข็งแรงมากกว่าทองแดง-10%นิกเกิล ในขณะเดียวกันถ้าหากขนาดของอะตอมที่ถูกนำผสมมีขนาดใหญ่หรือเล็กมาก ขีดจำกัดความสามารถในการถูกละลายได้มีมาก ทำให้กลไกการกระจายความแข็งแรงมีความแตกต่างมากขึ้น

ตามรูปที่ 5 แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มนิกเกิล ที่เป็นอะตอมแบบแทนที่เข้าสู่ผลึกตาข่ายของทองแดง ทำให้เกิดความแข็งแรงเพิ่มขึ้น [8]



รูปที่ 5 แสดงการเปลี่ยนแปลงธาตุผสมนิกเกิลต่อความเค้นแรงดึงที่จุดคราก สำหรับโลหะผสมทองแดง-นิกเกิล

ผลที่ได้จากความแข็งแรงอันเกิดโดยสารละลายแข็งต่อสมบัติของโลหะ สามารถจำแนกได้ดังนี้

- ก. ความเค้นแรงดึงสูงสุดหรือจุดคราก และความแข็งของโลหะผสม มีมากกว่าโลหะบริสุทธิ์
- ข. ความสามารถในการเปลี่ยนรูปได้ง่ายของโลหะผสม มีน้อยกว่าโลหะบริสุทธิ์ แต่ก็มีให้พบเห็นบ้างสำหรับบางโลหะผสมเช่น ทองแดง - สังกะสี ที่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นพร้อมกับความสามารถในการเปลี่ยนรูปได้ง่าย
- ค. ความสามารถในการนำไฟฟ้าของโลหะผสม มักจะต่ำกว่าโลหะบริสุทธิ์มาก สารละลายแข็งที่ทรงพลังของลวดทองแดงหรืออะลูมิเนียม ไม่นิยมใช้เป็นสายส่งกำลังไฟฟ้าแรงสูง เนื่องจากเหตุผลดังกล่าว
- ง. ความต้านทานต่อการครีพ (Creep) หรือการสูญเสียความแข็งแรง เมื่อโลหะผสมได้รับอุณหภูมิสูงถูกปรับให้ดีขึ้นโดยสารละลายแข็งที่ทรงพลัง อุณหภูมิสูงที่ใช้สำหรับเครื่องยนต์เจ็ท ก็ได้เป็นเหตุที่จะลดความแข็งแรงในโลหะผสมที่ประกอบเป็นตัวเครื่องยนต์นั้น

4. ความแข็งแรงที่เกิดโดยความตึงเครียด (Strain hardening)

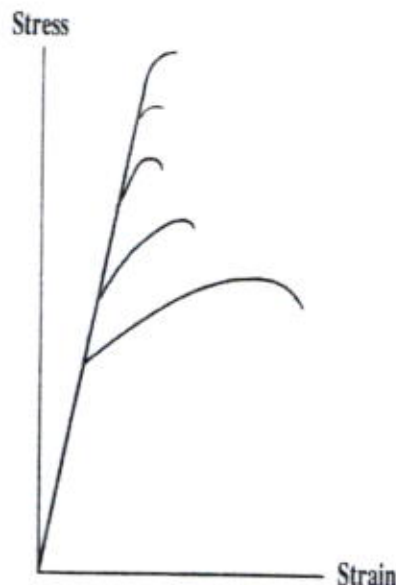
ความแข็งแรงที่เกิดโดยวิธีนี้เป็นปรากฏการณ์ จากการที่เป็นโลหะเปลี่ยนรูปได้ง่าย มาเป็นโลหะที่แข็งและแข็งแรงกว่า เสมือนการเปลี่ยนรูปพลาสติก บางครั้งเรียกว่าความแข็งแรงจากการทำงาน (Work hardening) หรือความแข็งแรงจากการกระทำงานเย็น (Cold working) ทั้งนี้สืบเนื่องจากช่วงอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนรูปวัสดุจากที่เรียกว่าเย็น แปรเปลี่ยนเป็นช่วงอุณหภูมิหลอมละลายที่สมบูรณ์ โดยความแข็งแรงจากความตึงเครียดเกิดขึ้น ณ อุณหภูมิห้อง ความเหมาะสมหลายประการของการกำหนดสูตร ซึ่งเป็นระดับของการเปลี่ยนรูปพลาสติก เสมือนเป็นเปอร์เซ็นต์ของการกระทำงานเย็น มากกว่าที่จะใช้กฎของค่าสัมประสิทธิ์ความตึงเครียด ดังสมการ

$$\%cw = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100 \quad \text{-----(4)}$$

เมื่อ A_0 คือ พื้นที่ภาคตัดแรกเริ่มของโลหะ, A_f คือ พื้นที่ภาคตัดสุดท้ายภายหลังการเปลี่ยนรูป

การขึ้นรูปโลหะหลายวิธีใช้ในการเปลี่ยนรูป กล่าวได้ว่าสามารถเปลี่ยนรูปพร้อมทั้งเกิดความแข็งแรงได้ในเวลาเดียวกัน เป็นการกระทำงานเย็นต่างๆ[3] เช่น Rolling , Forging , Drawing , Extrusion , Deep drawing, Stretch forming, Bending เป็นต้น ทั้งนี้แล้วการควบคุมจำนวนการเปลี่ยนรูปก็คือ การควบคุมความแข็งแรงจากความดึงเครียด การวัดจำนวนการเปลี่ยนรูปโดยปกติจะใช้เปอร์เซ็นต์ของการกระทำงานเย็น

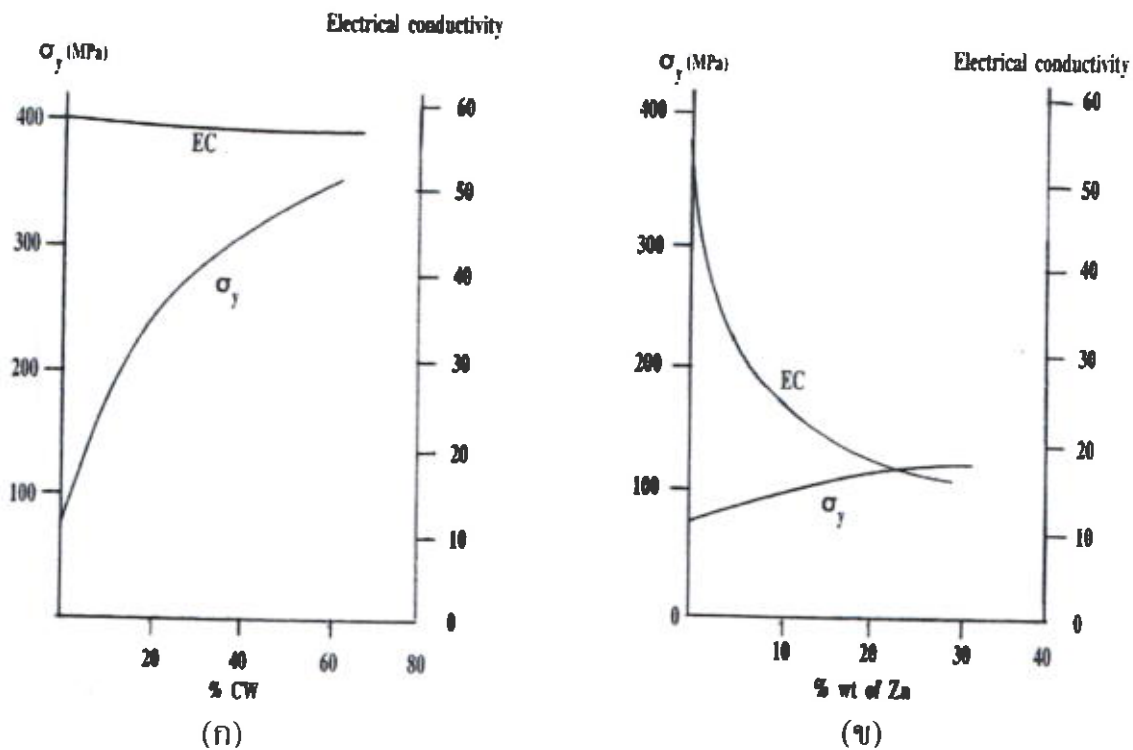
ความสัมพันธ์ของการกระทำงานเย็นต่อเส้นโค้ง Stress - strain อธิบายได้ว่า โค้งดังกล่าวที่เป็นของโลหะชนิดเปลี่ยนรูปง่าย เมื่อขึ้นรูปครั้งแรกด้วยวิธีใดๆดังกล่าวแล้วข้างต้น ก็จะได้ความเค้นแรงดึงที่จุดครากในระดับหนึ่ง ซึ่งเป็นระดับถาวร หากไม่มีการกระทำด้วยแรงที่ต้องการเปลี่ยนรูปซ้ำอีก หรือเมื่อมีการกระทำเพื่อเปลี่ยนรูปซ้ำ จุดโค้งเดิมที่เป็นความแข็งแรงสูงสุด จะแปรเปลี่ยนเป็นจุดครากของโค้งการเปลี่ยนรูปรอบใหม่ จึงอธิบายได้ว่าเมื่อมีการกระทำเพื่อเปลี่ยนรูปซ้ำ ความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความสามารถในการเปลี่ยนรูปได้ง่ายจะลดลง การใช้แรงเพื่อกระทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปซ้ำในครั้งต่อไป ต้องใช้เพิ่มขึ้นอีก ดังนั้นจึงได้ความแข็งแรงสูงสุด และที่จุดครากเพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันความสามารถในการเปลี่ยนรูปก็จะลดลงไปอีก ดังแสดงตามรูปที่ 6 [2]



รูปที่ 6 แสดงการกระทำเพื่อเปลี่ยนรูปโลหะซ้ำหลายครั้ง ความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง ขณะเดียวกัน

ความสามารถในการเปลี่ยนรูปจะลดลงอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งโลหะนั้นมีความเปราะสูงสุด ลักษณะเฉพาะของความแข็งแรงที่เกิดขึ้น โดยความดึงเครียด มีลักษณะดังนี้ [7]

- ก. โลหะผสมสามารถที่จะเปลี่ยนรูปได้ตามความปรารถนา พร้อมกับเพิ่มความแข็งแรงได้ในขณะเดียวกัน
- ข. พิกัดขนาดและผิวสำเร็จสามารถเกิดขึ้นได้ โดยกระบวนการของการกระทำงานเย็น
- ค. กระบวนการของการกระทำงานเย็น เป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายไม่สูง สำหรับการผลิตชิ้นส่วนเล็กๆจำนวนมาก
- ง. ความสามารถในการเปลี่ยนรูปได้ง่าย, ความสามารถในการนำไฟฟ้า และความต้านทานต่อการกัดกร่อนทั้งหมดที่กล่าวมานี้มีค่าลดลง โดยผ่านการกระทำงานเย็น การกระทำงานเย็นทำให้เกิดความสูญเสีย ประสิทธิภาพที่กล่าวข้างต้น น้อยกว่าความแข็งแรงที่เกิดโดยสารละลายแข็ง ดังรูปเปรียบเทียบที่ 7 การกระทำงานเย็นเป็นหนทางที่น่าเชื่อถือในการผลิตสำหรับวัสดุนำไฟฟ้าความแข็งแรงสูง เช่นลวดทองแดงที่ใช้เป็นสายไฟฟ้า



รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบความแข็งแรงของทองแดงโดยวิธี [2]

(ก) การกระทำงานเย็น

(ข) การผสมธาตุสังกะสีเพื่อเพิ่มความแข็งแรง

จากรูปแสดงให้เห็นว่าความแข็งแรงจากวิธี(ก)มีมากกว่า อีกทั้งมีผลกระทบน้อยต่อความสามารถในการนำไฟฟ้า(หน่วยเป็น $\mu\Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$) เมื่อเทียบกับวิธี(ข)

5. สรุป (Conclusions)

กลไกความแข็งแรงในโลหะทั้งสามที่กล่าวมา อาจถูกใช้ให้เกิดความแข็งแรงและความแข็งแรงของโลหะผสมเฟสเดี่ยว (Single phase) โดยที่ทั้งหมดแล้ววิธีการใดวิธีการหนึ่ง อาจมีการร่วมกระทำกับอีกวิธีการหนึ่งได้ เช่น โลหะผสมจากความแข็งแรงที่เกิดโดยสารละลายแข็ง อาจทำให้แข็งแรงขึ้นอีกโดยความดัดเครียด และเป็นไปได้อีกด้วยว่า ผลของความแข็งแรงอันเนื่องมาจากการลดขนาดเกรนและโดยความดัดเครียดอาจถูกขจัดออก หรืออย่างน้อยที่สุดถูกลดโดยการกระทำทางความร้อน ในทางกลับกันความแข็งแรงที่เกิดโดยสารละลายแข็ง จะไม่มีผลต่อการกระทำทางความร้อนเท่าใดนัก เนื่องจากมีสมบัติของอุณหภูมิสูงที่ดีในโลหะผสมนั้น

6. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์ นครนายก ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ต่อข้อมูล และสถานที่ทดลอง เพื่อความสำเร็จของบทความนี้

7. เอกสารอ้างอิง(References)

- [1] กัมพัทธ์วิชัย พลุปราชญ์, "วัสดุวิศวกรรม," คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์ นครนายก. หน้า 290, 2540.
- [2] Askeland, D. R., "The Science and Engineering of Materials," 3rd ed., Chapman & Hall, Oxford, 1996.
- [3] Groover, M. P., "Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems," 3rd Ed., John Wiley & Sons (Asia), 2007.
- [4] Kazeminezhad, M. and Taheri, A. K., *Mater. sci. Technol.*, 20, 106, 2004.
- [5] Pickering, F. B., "Physical Metallurgy and the Design of Steels," *Applied Science Publishers*, 1978.
- [6] Schaffer, J. P. and Saxena, A., "The Science and Design of Engineering Materials," 2nd ed., USA, the McGraw-Hill, 1999.
- [7] Schweitzer, P. A., "Metallic Materials," Physical, Mechanical, and Corrosion Properties, NY, Marcel Dekker, 2003.
- [8] Shackelford, J. F., "Introduction to Materials Science for Engineers," 5th ed., NJ, Prentice Hall, 2000.
- [9] Zhang, J. and Baker, T. N., *ISIJ int.*, vol. 43, pp. 2015, 2003.