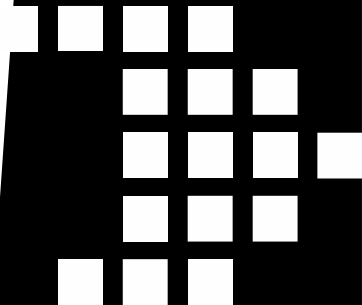


CHULA Σ ENGINEERING

Innovation toward Sustainability | ACTNOW



หลักกล้าเสริมแรง ในงานคอนกรีต

15 พฤษภาคม 2568

ผศ. ดร. นิธิ แสนอาจหาญ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- 01 สมบัติทางกลของเหล็กข้ออ้อย และการปรับปรุงสมบัติทางกล
- 02 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กข้ออ้อย T และ nonT
- 03 Micro-alloying elements ในเหล็กข้ออ้อย และวัตถุประสงค์ในการเติม
- 04 การเสียหายจากความล้า (Fatigue) ของวัสดุโลหะ
- 05 กลไกของ Boron ต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของเหล็กกล้า

01 สมบัติทางกลของเหล็กข้ออ้อย และการปรับปรุงสมบัติทางกล

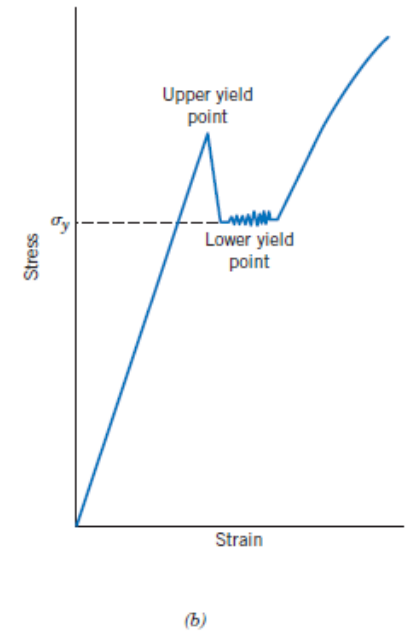
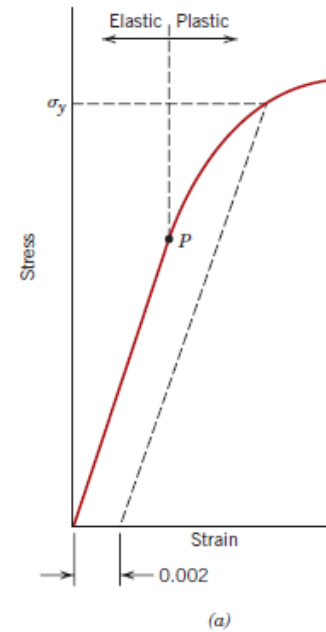
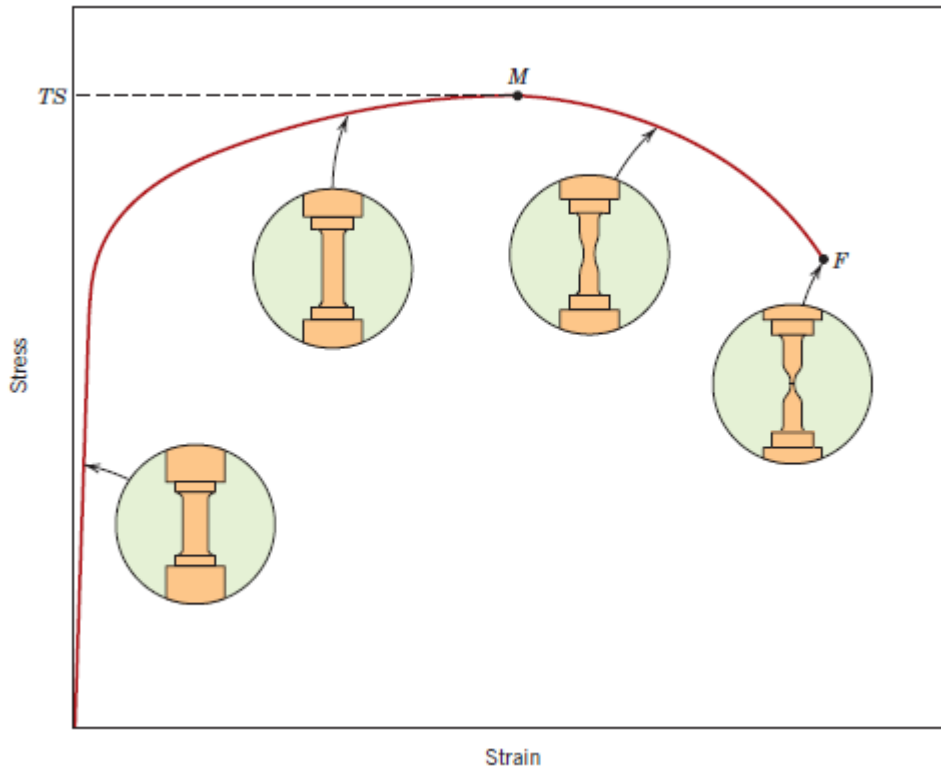
สมบัติทางกลของเหล็กข้ออ้อย และการปรับปรุงสมบัติทางกล

ตารางที่ 7 ความต้านแรงดึง ความต้านแรงดึงที่จุดครากและความยืดของเหล็กข้ออ้อย
(ข้อ 3.1 และข้อ 6.3.1)

ชั้นคุณภาพ	ความต้านแรงดึง MPa	ความต้านแรงดึงที่จุดคราก MPa	ความยืด %
SD 30	480	295	17
SD 40	560	390	15
SD 50	620	490	13

รูปที่ 1 สมบัติทางกลที่ทดสอบของเหล็กข้ออ้อยตามมาตรฐาน มอก.24-2559

สมบัติทางกลของเหล็กข้ออ้อย และการปรับปรุงสมบัติทางกล



รูปที่ 2 ตัวอย่างกราฟผลการทดสอบทดสอบแรงดึงของชิ้นงานโลหะ

สมบัติทางกลของเหล็กข้ออ้อย และการปรับปรุงสมบัติทางกล

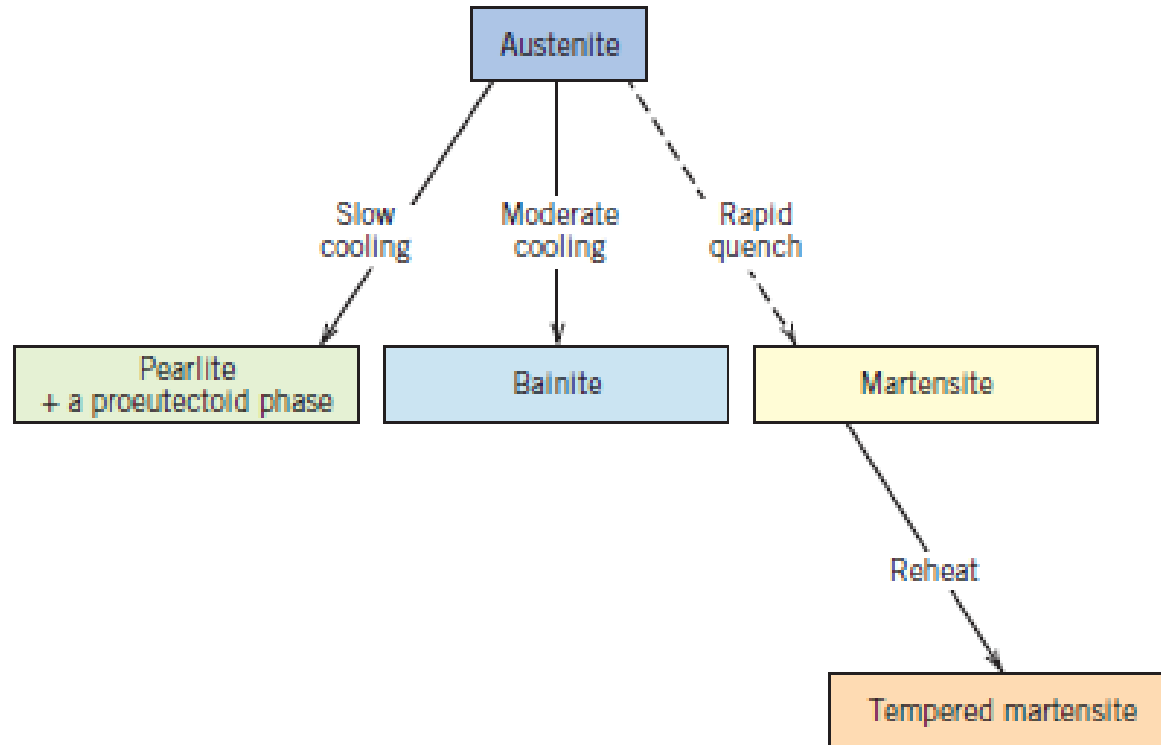
การปรับปรุงสมบัติทางกลของเหล็กกล้า (เพิ่มความแข็งแรง)

- การเติมธาตุผสมในรูปสารละลายของแข็ง
- การขึ้นรูปเย็น
- การลดขนาดเกรน
- การแข็งขึ้นจากการตกตะกอน
- การแปลงเฟสของออสเทนไนต์

การปรับปรุง
ส่วนผสม

การปรับปรุง
กระบวนการ

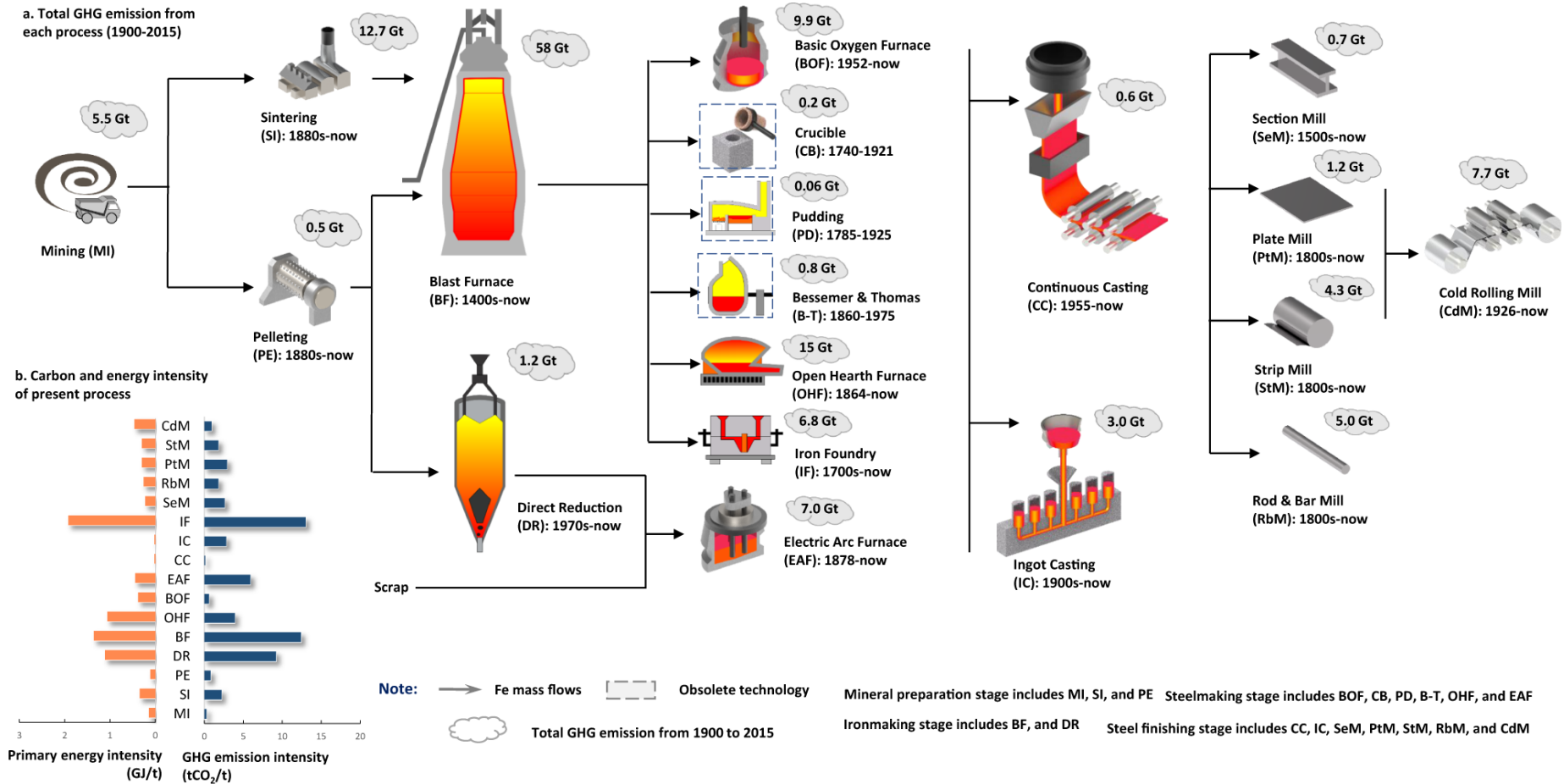
สมบัติทางกลของเหล็กข้ออ้อย และการปรับปรุงสมบัติทางกล



รูปที่ 3 การแปลงเฟสของออสเทนไนต์เมื่อเย็นตัวด้วยอัตราการเย็นตัวต่างกัน

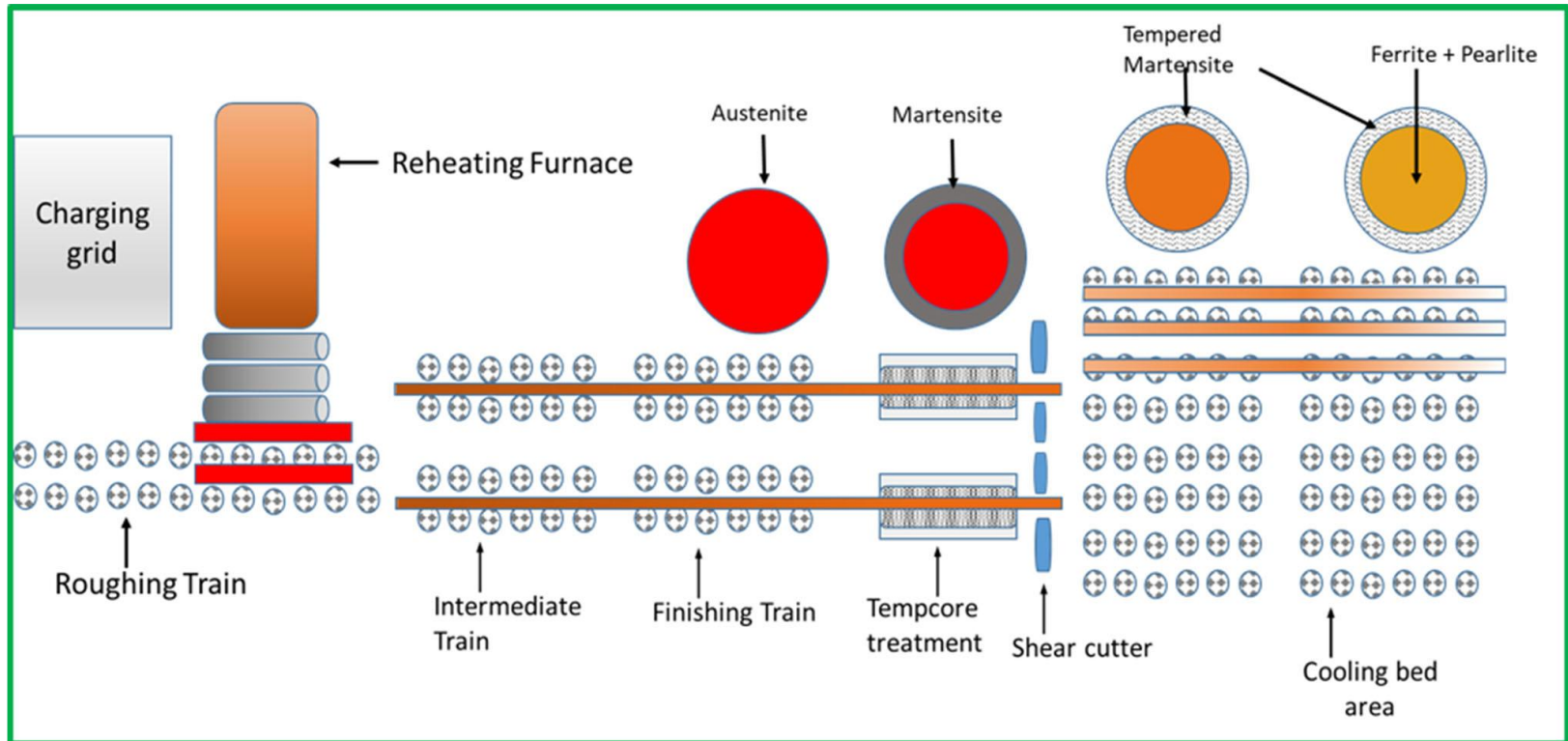
02 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กข้ออ้อย T และ nonT

โครงสร้างจุลภาคของเหล็กข่ออ้ย T และ nonT



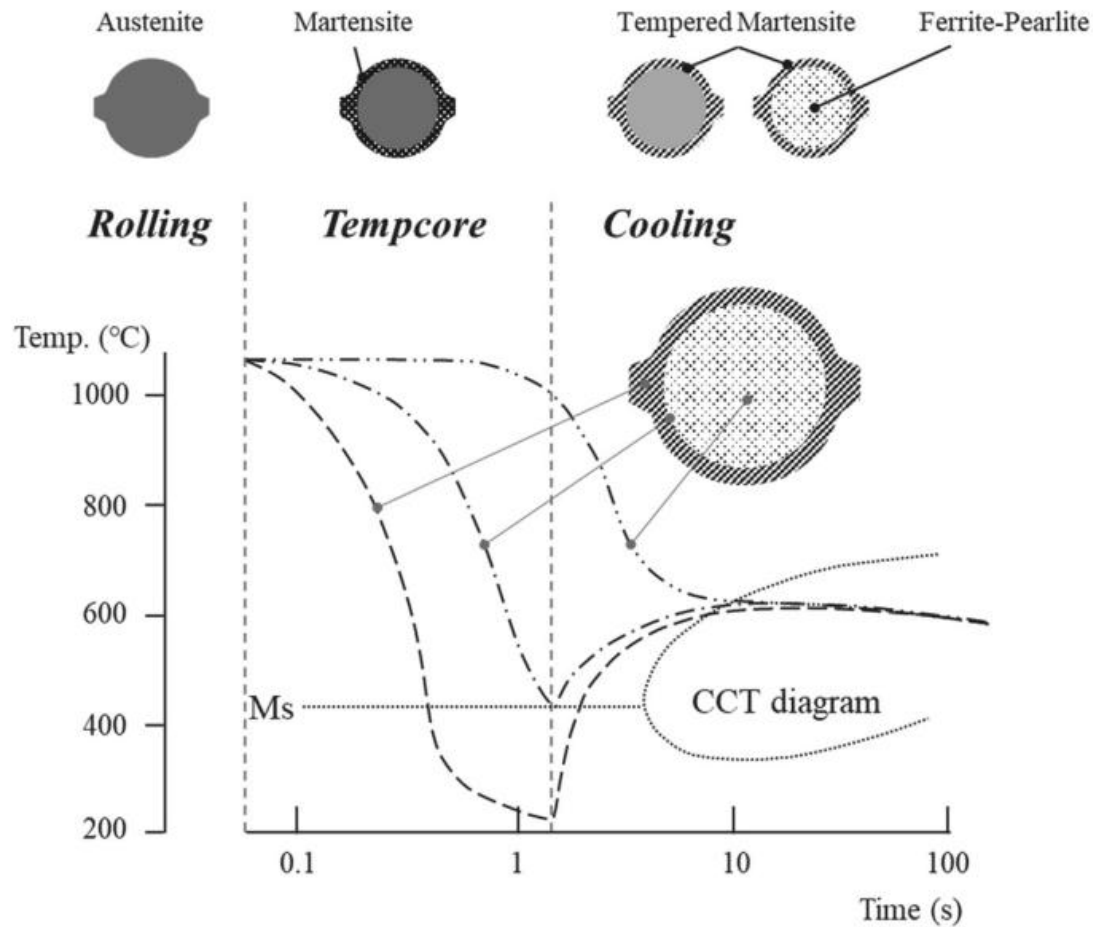
รูปที่ 4 กระบวนการผลิตเหล็กกล้าโดยภาพรวม

โครงสร้างจุลภาคของเหล็กข้ออ้อย T และ nonT



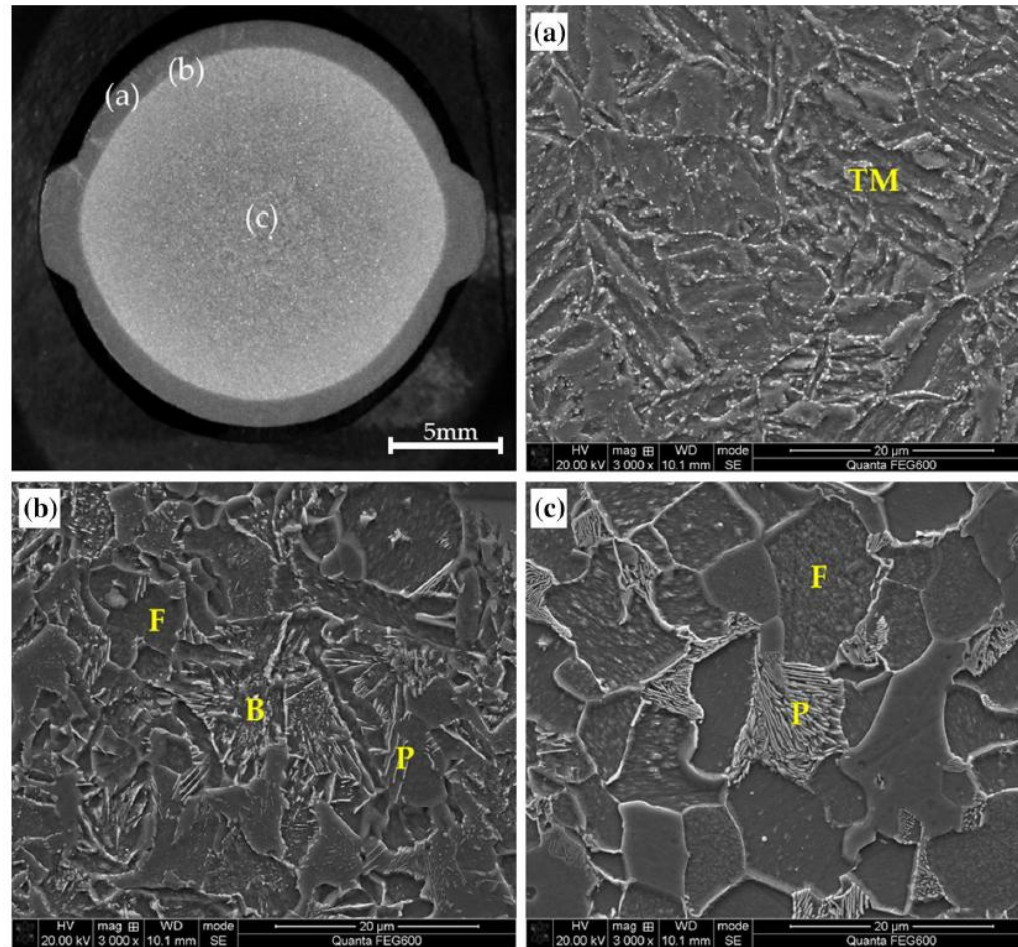
รูปที่ 5 กระบวนการลดอุณหภูมิในการผลิตเหล็กเส้น Tempcore

โครงสร้างจุลภาคของเหล็กข้ออ้อย T และ nonT



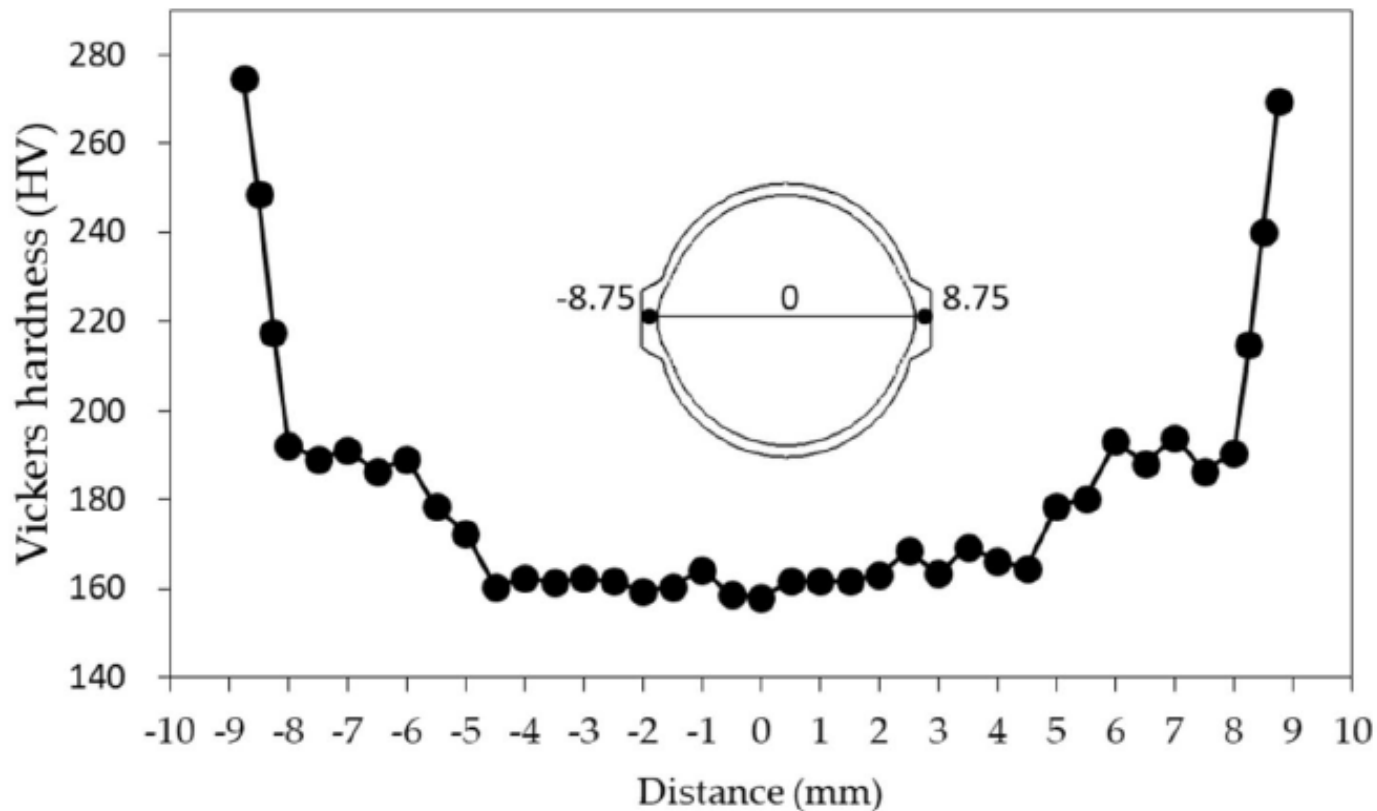
รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคขณะเย็นตัวของเหล็กข้ออ้อยแบบ T

โครงสร้างจุลภาคของเหล็กข้ออ้อย T และ nonT



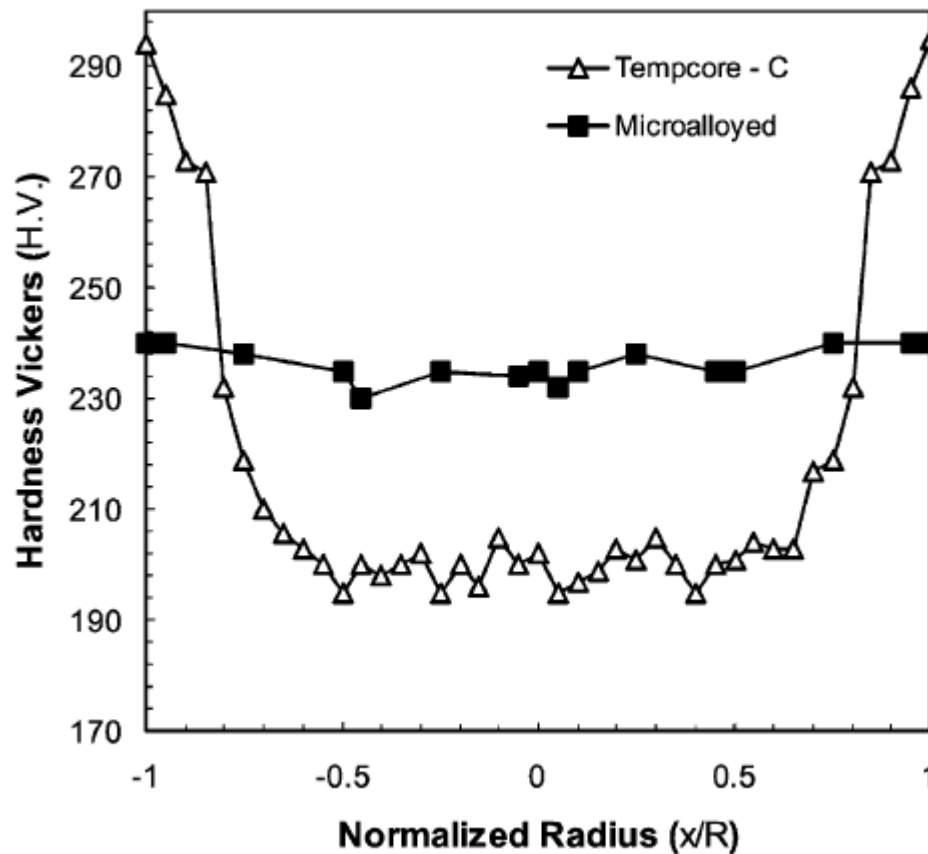
รูปที่ 7 โครงสร้างจุลภาคที่บริเวณต่างๆในภาคตัดขวางของเหล็กข้ออ้อยแบบ T

โครงสร้างจุลภาคของเหล็กข้ออ้อย T และ nonT



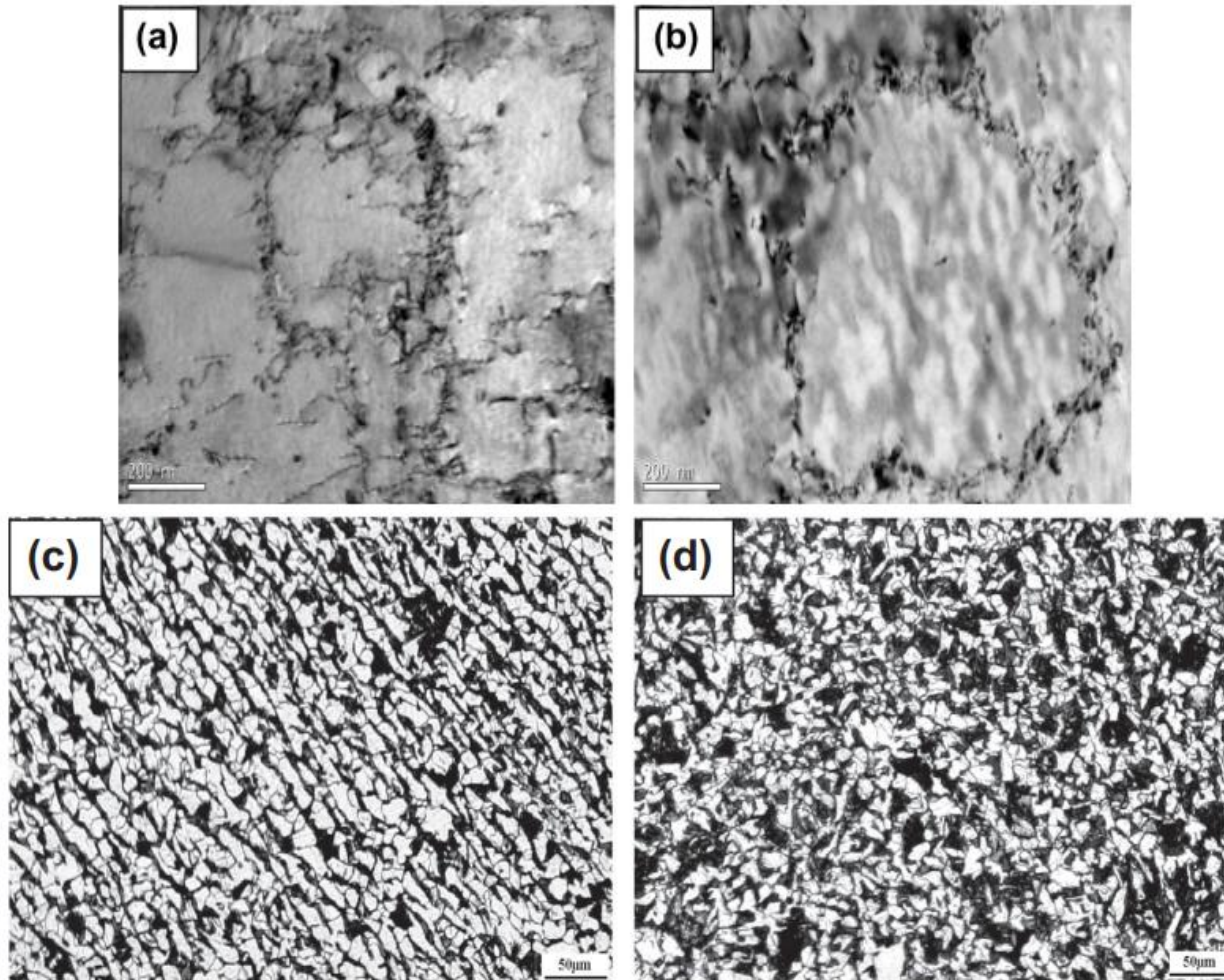
รูปที่ 8 ตัวอย่างค่าความแข็งตลอดหน้าตัดขวางของเหล็กข้ออ้อยแบบ T

โครงสร้างจุลภาคของเหล็กข้ออ้อย T และ nonT



รูปที่ 9 เปรียบเทียบค่าความแข็งตลอดหน้าตัดขวางของเหล็กข้ออ้อย
แบบ T และเหล็กกล้า Microalloyed (nonT)

โครงสร้างจุลภาคของเหล็กข้ออ้อย T และ nonT



รูปที่ 10 โครงสร้างจุลภาคที่ของเหล็กข้ออ้อยแบบ nonT (microalloyed)

03 Micro-alloying elements ในเหล็กข้ออ้อย และวัตถุประสงค์ในการเติม

Micro-alloying elements ในเหล็กข้ออ้อย และวัสดุประสงค์ในการเติม

Micro-alloying elements:

Niobium (Nb)

Titanium (Ti)

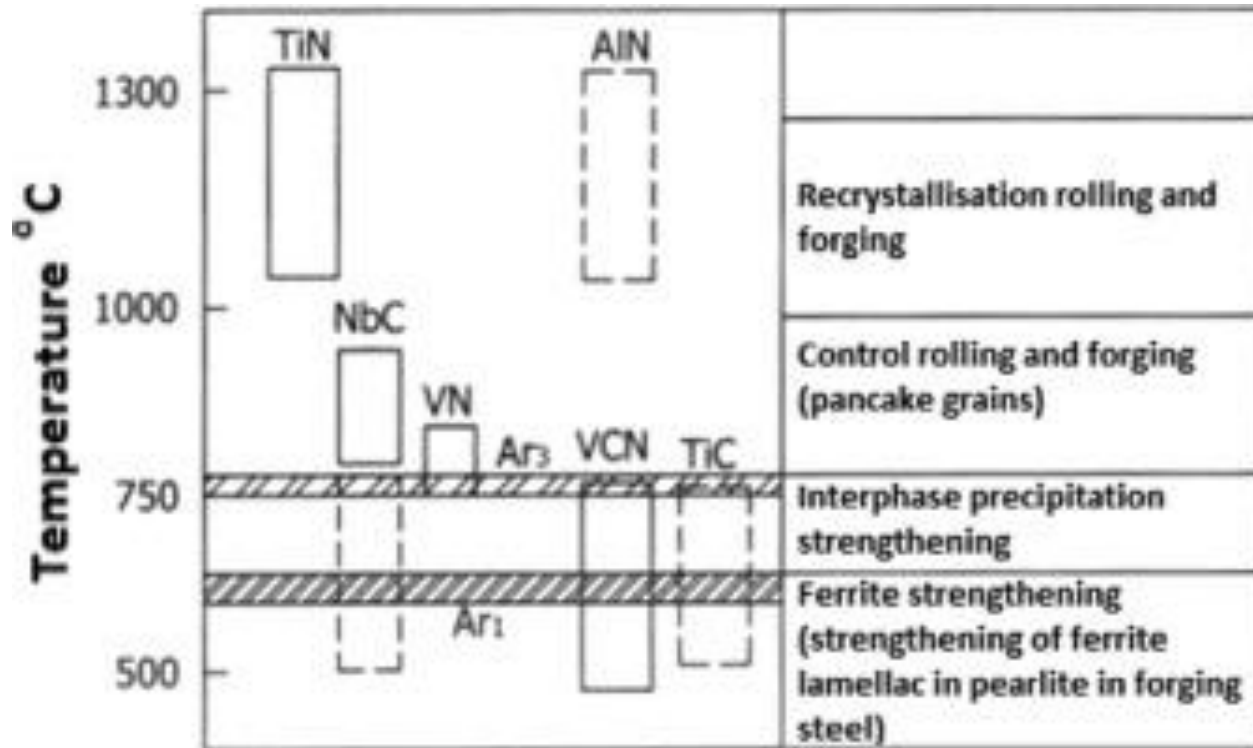
Vanadium (V)

Concentration not exceed 0.1 wt%

Formation of MX carbide, nitride, or carbonitride precipitates

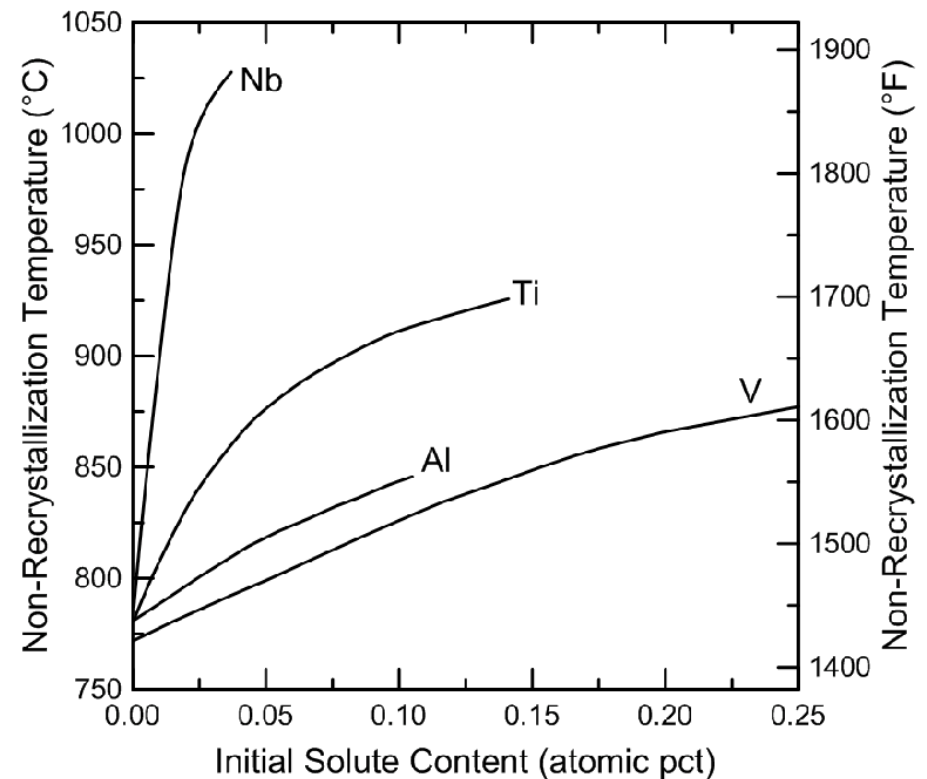
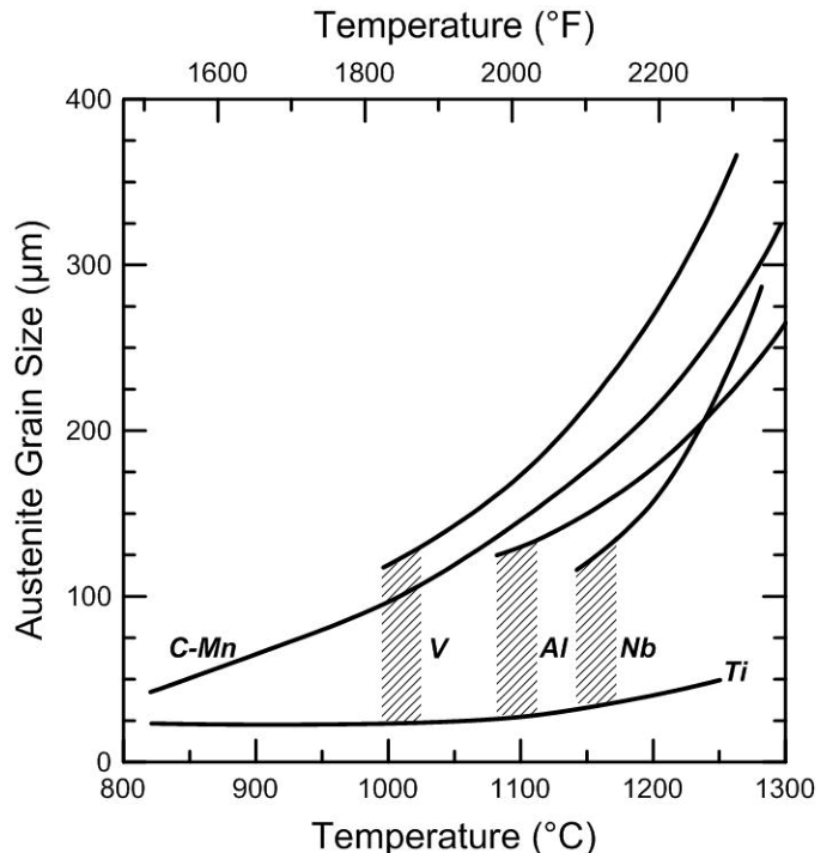
Can be produced with Thermo-mechanical controlled process (TMCP) to achieve small grain size

Micro-alloying elements ในเหล็กข้ออ้อย และวัสดุประสงค์ในการเติม



รูปที่ 11 อุณหภูมิการตกผลึกของตะกอน Micro-alloying elements ชนิดต่างๆ

Micro-alloying elements ในเหล็กข้ออ้อย และวัสดุประสงค์ในการเติม



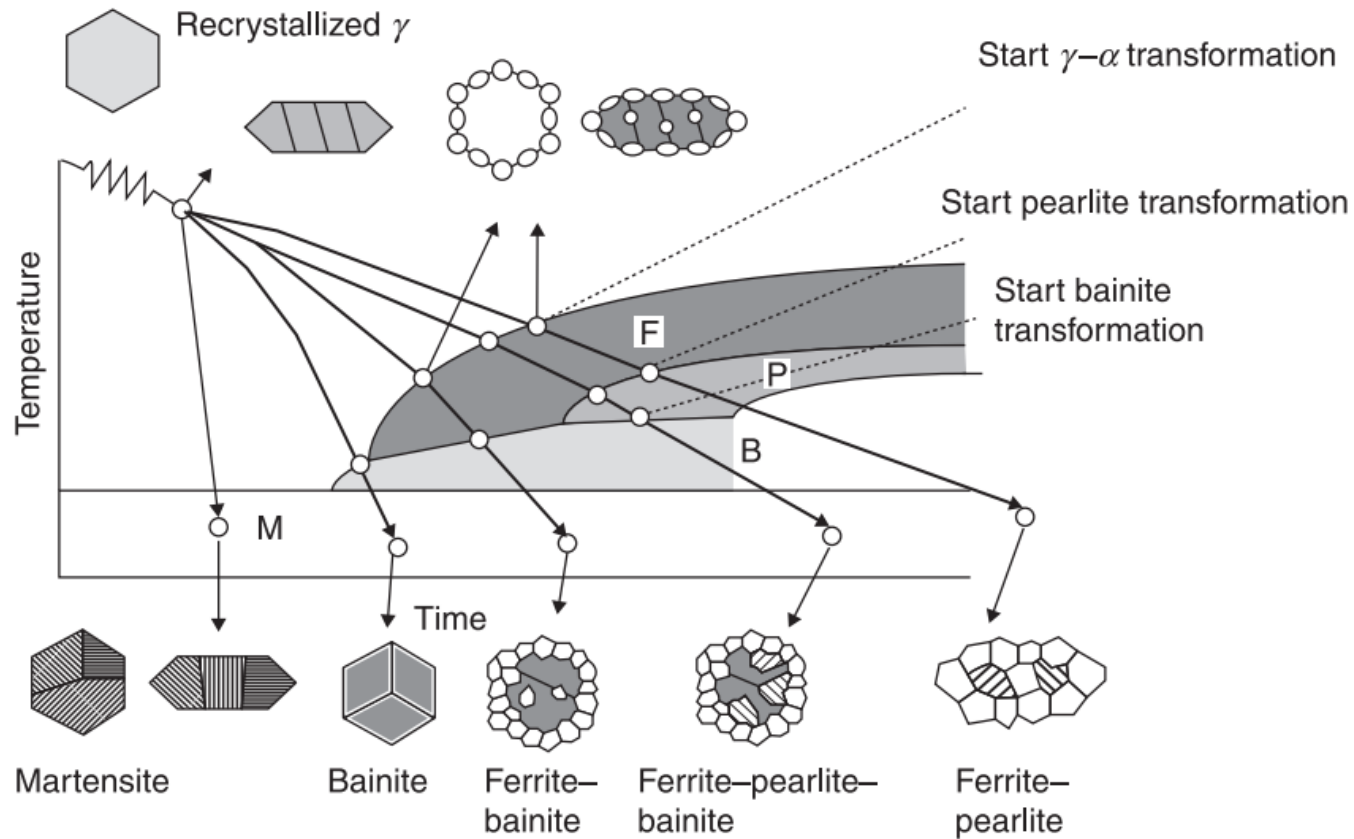
รูปที่ 12 ผลของ Micro-alloying elements ขนาดเกรนออสเทนไนต์และอุณหภูมิตกผลึกใหม่

Cuddy, L. J., and J. C. Raley. "Austenite grain coarsening in microalloyed steels." *Metallurgical Transactions A* 14

(1983): 1989-1995.

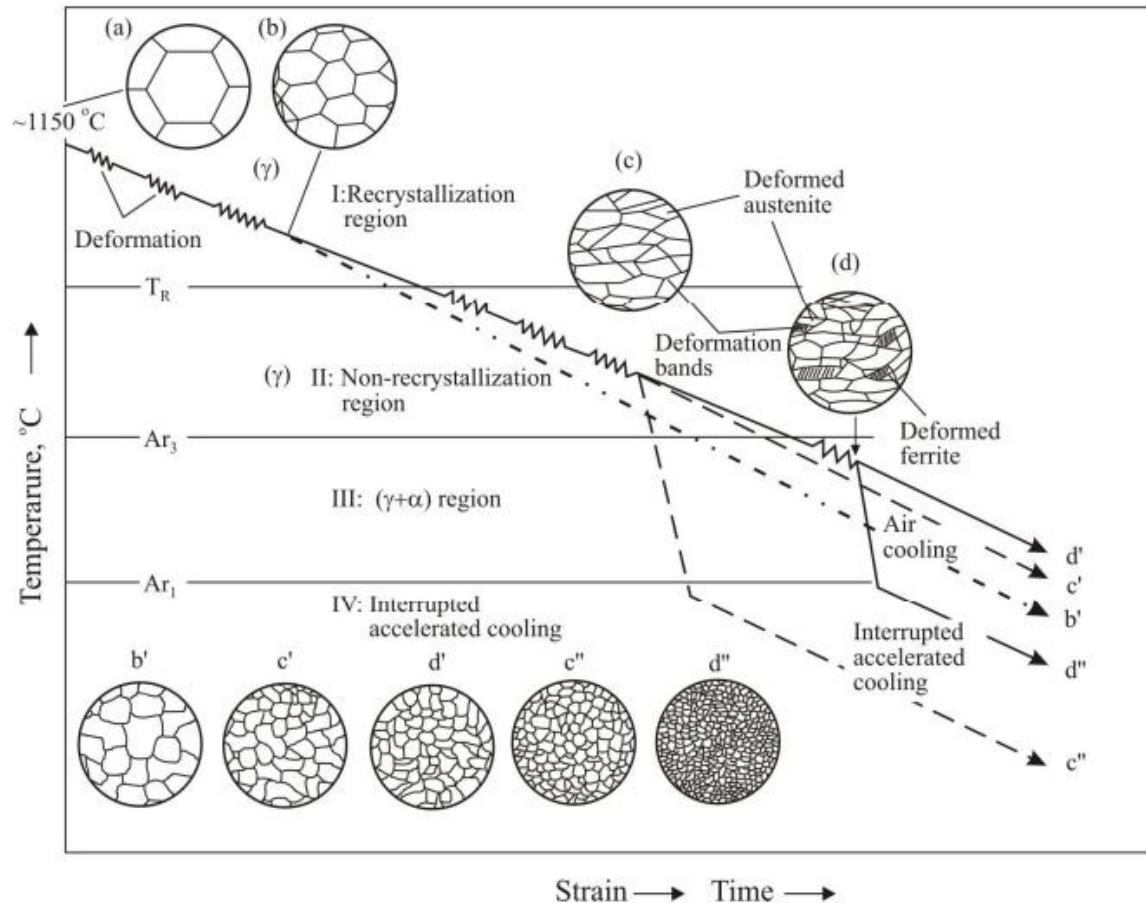
Cuddy, L. J. "Plastic deformation of metals." (1975): 129-140

Micro-alloying elements ในเหล็กข้ออ้อย และวัสดุประสงค์ในการเติม



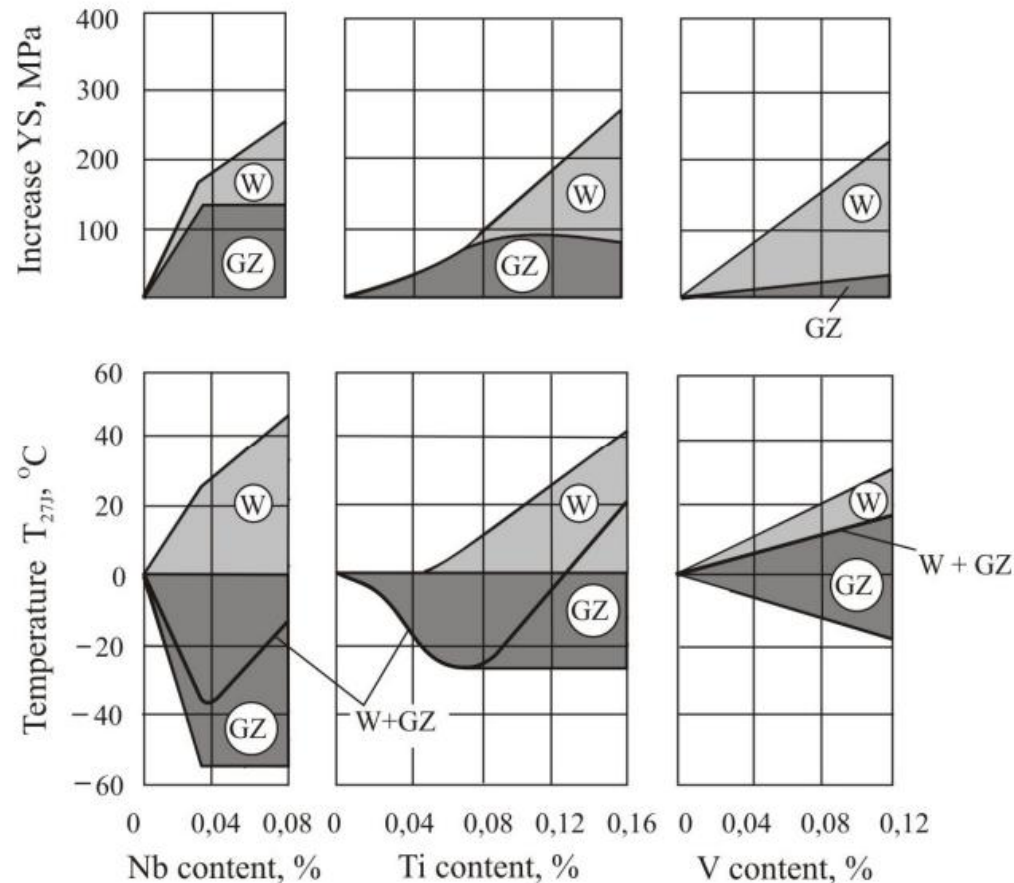
รูปที่ 13 ผลของการลดอุณหภูมิหลังขึ้นรูปร้อนต่อโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า

Micro-alloying elements ในเหล็กข้ออ้อย และวัสดุประสงค์ในการเติม



รูปที่ 14 ตัวอย่างกระบวนการ TMCP ของเหล็กกล้า

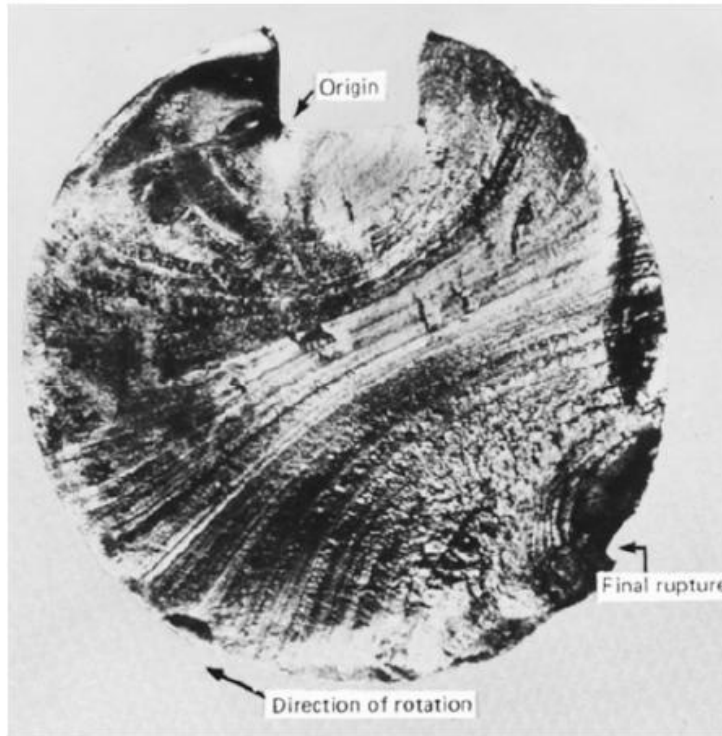
Micro-alloying elements ในเหล็กข้ออ้อย และวัสดุประสงค์ในการเติม



รูปที่ 15 ผลของ Micro-alloying elements ต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของเหล็กกล้า

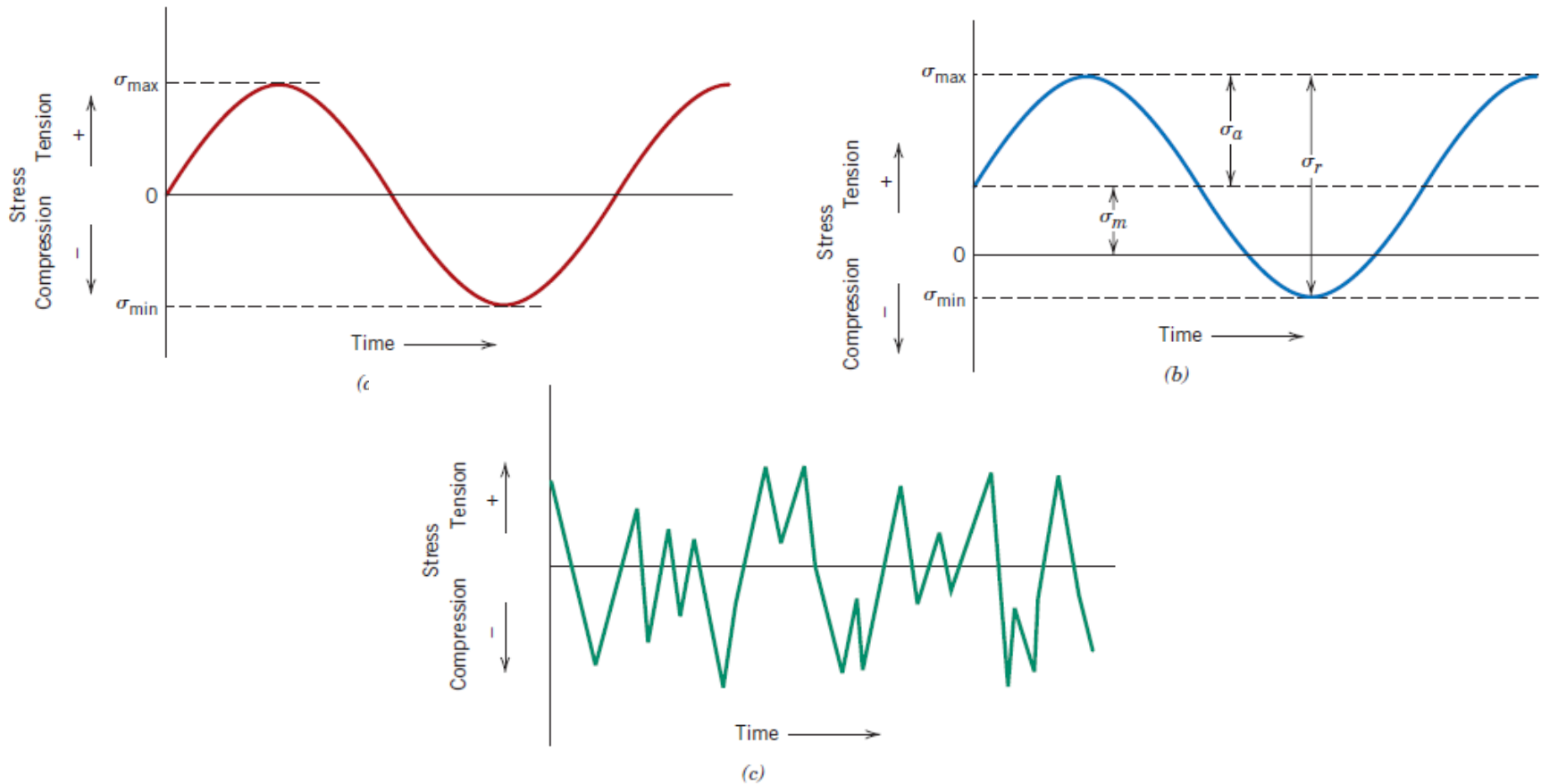
04 การเสียหายจากความล้า (Fatigue) ของวัสดุโลหะ

การเสียหายจากความล้า (Fatigue) ของวัสดุโลหะ



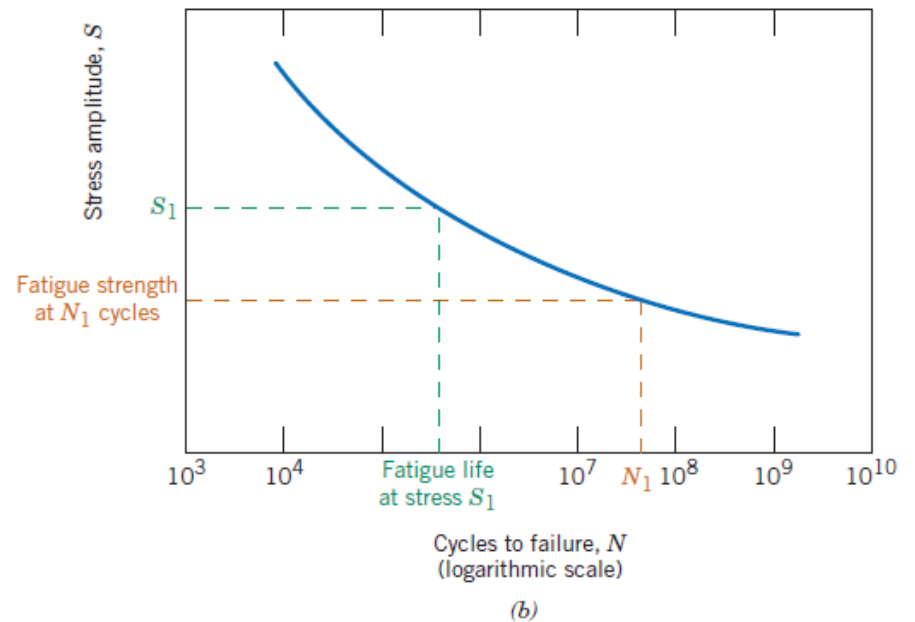
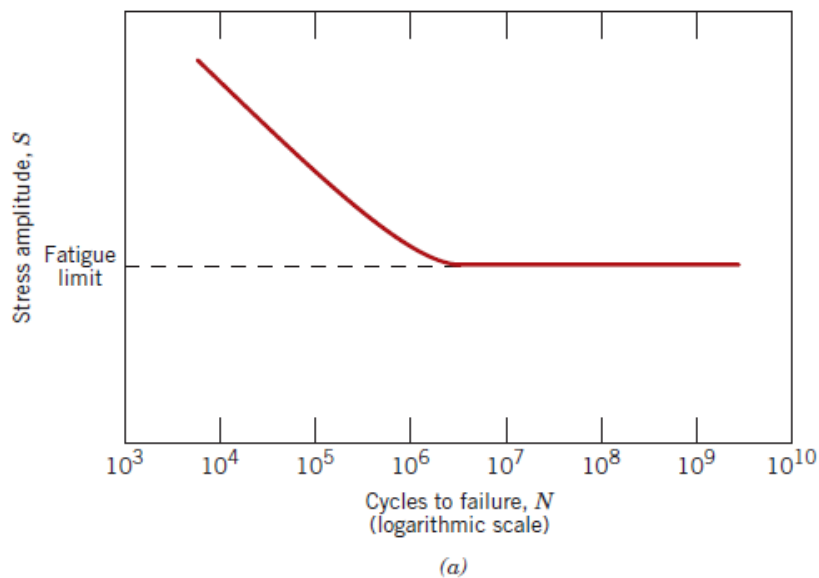
รูปที่ 16 ลักษณะการรับแรงของวัสดุที่ทำให้เกิดความล้า

การเสียหายจากความล้า (Fatigue) ของวัสดุโลหะ



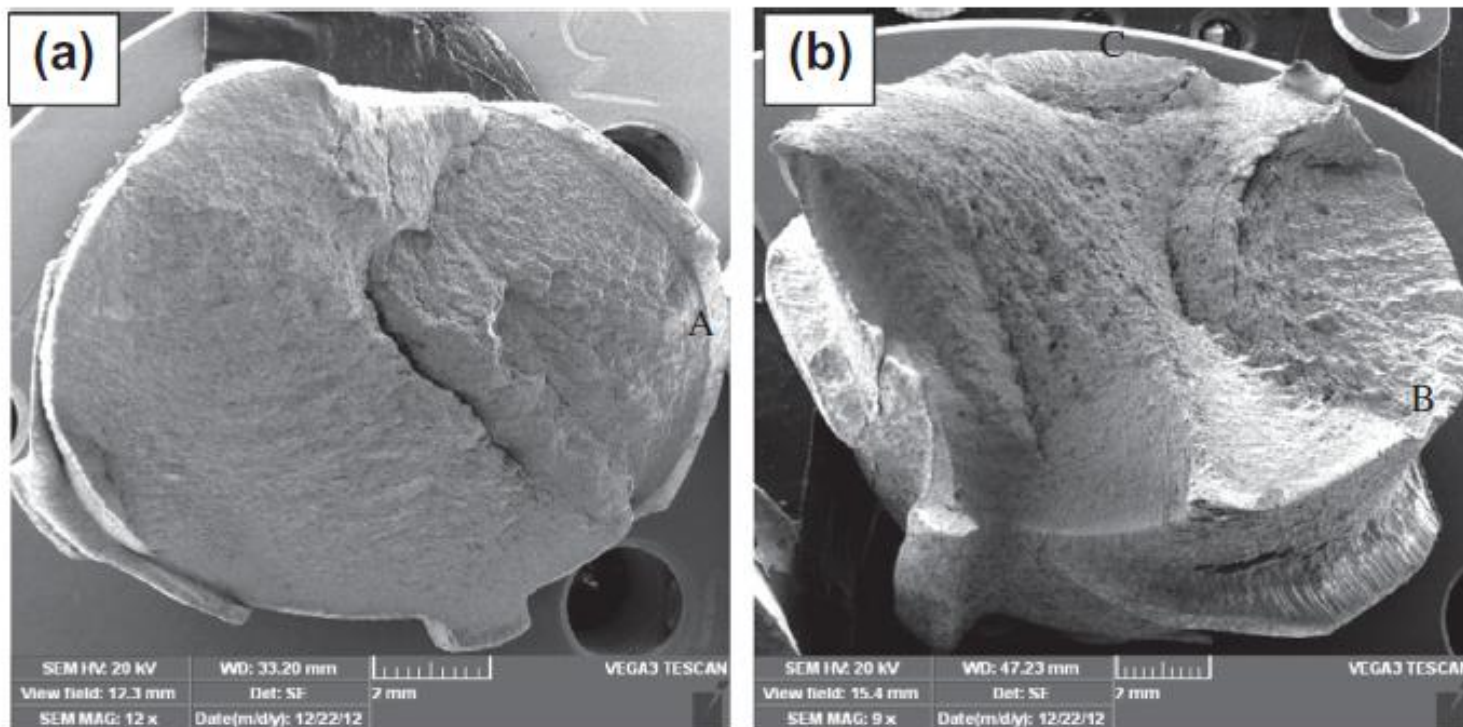
รูปที่ 17 ลักษณะการรับแรงของวัสดุที่ทำให้เกิดความล้า

การเสียหายจากความล้า (Fatigue) ของวัสดุโลหะ



รูปที่ 18 ผลการทดสอบความล้าแบบ S-N Curve

การเสียหายจากความล้า (Fatigue) ของวัสดุโลหะ

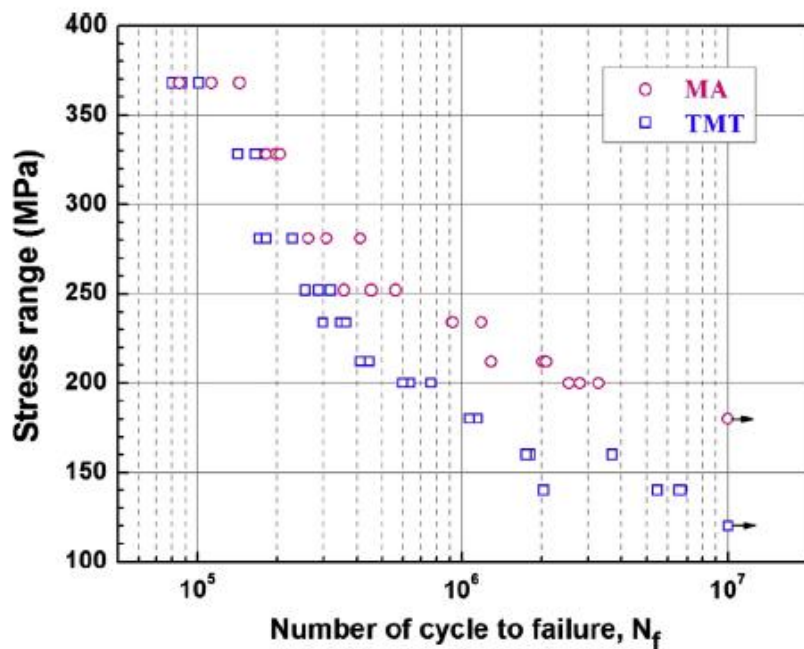


เหล็กข้ออ้อย Microalloyed (nonT)

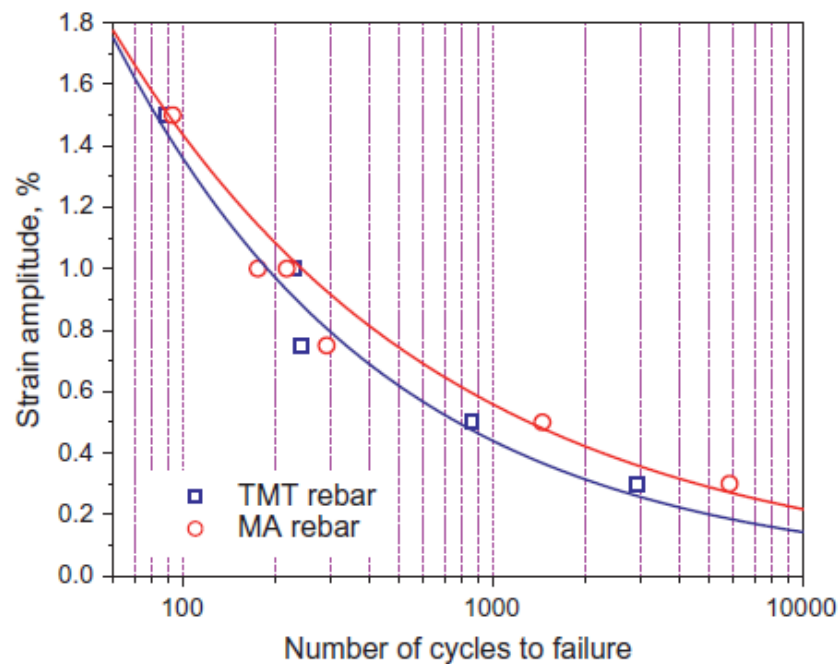
เหล็กข้ออ้อย Tempcore (T)

รูปที่ 19 ลักษณะของการเกิดความเสียหายจากความล้าในเหล็กข้ออ้อย

การเสียหายจากความล้า (Fatigue) ของวัสดุโลหะ



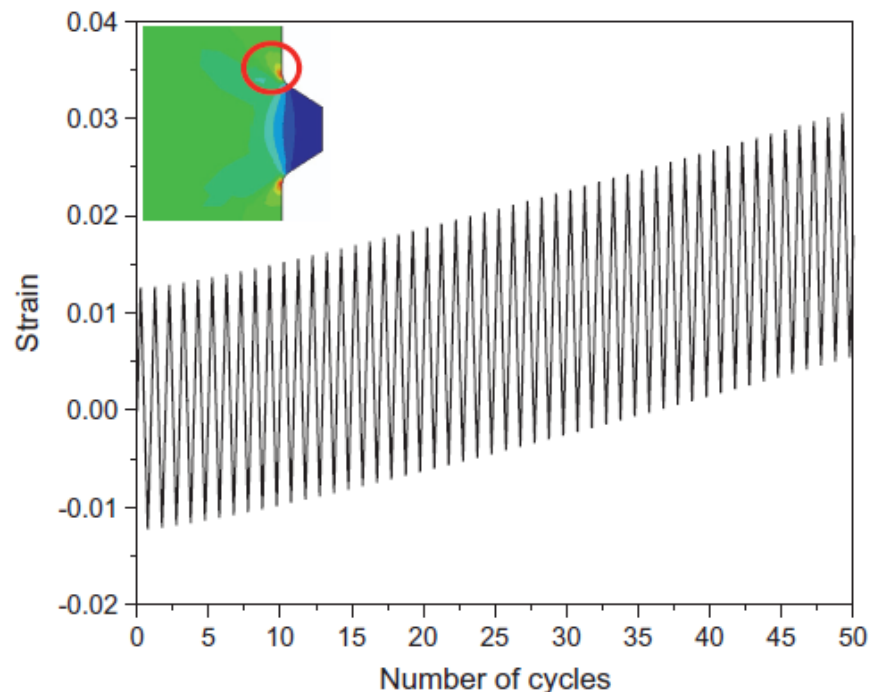
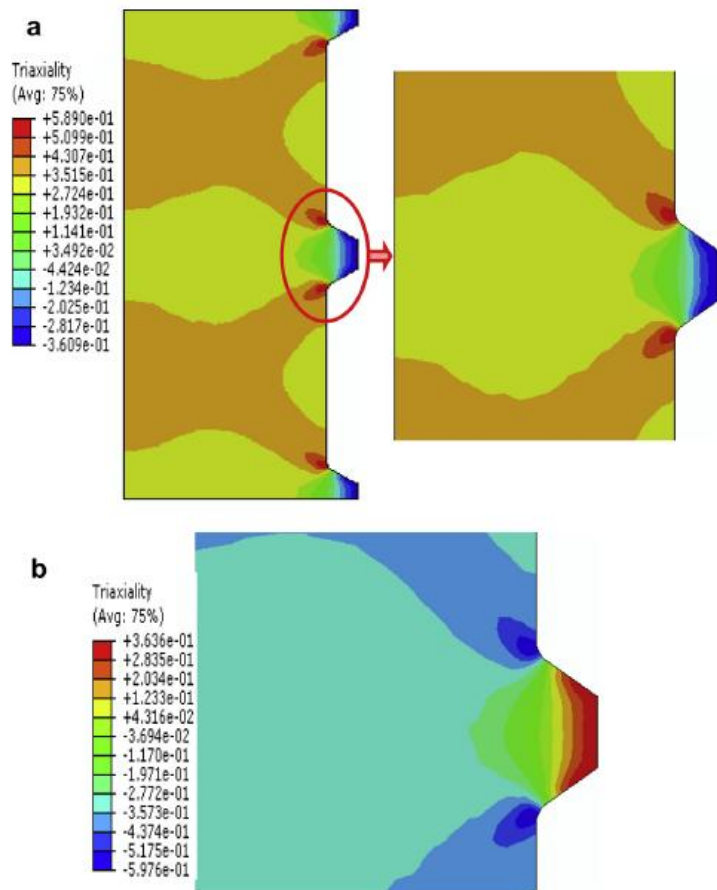
High cycle fatigue test



Low cycle fatigue test

รูปที่ 20 ผลการทดสอบความล้าแบบ High cycle และ Low cycle ของเหล็กข้ออ้อย

การเสียหายจากความล้า (Fatigue) ของวัสดุโลหะ



รูปที่ 21 ภาพจำลองการกระจายตัวของความเค้นในเหล็กข้ออ้อยเมื่อได้รับแรงกระทำ และการเปลี่ยนแปลงของความเค้นในบริเวณบั้งของชิ้นงานเมื่อได้รับแรงกระทำเป็รอบๆ

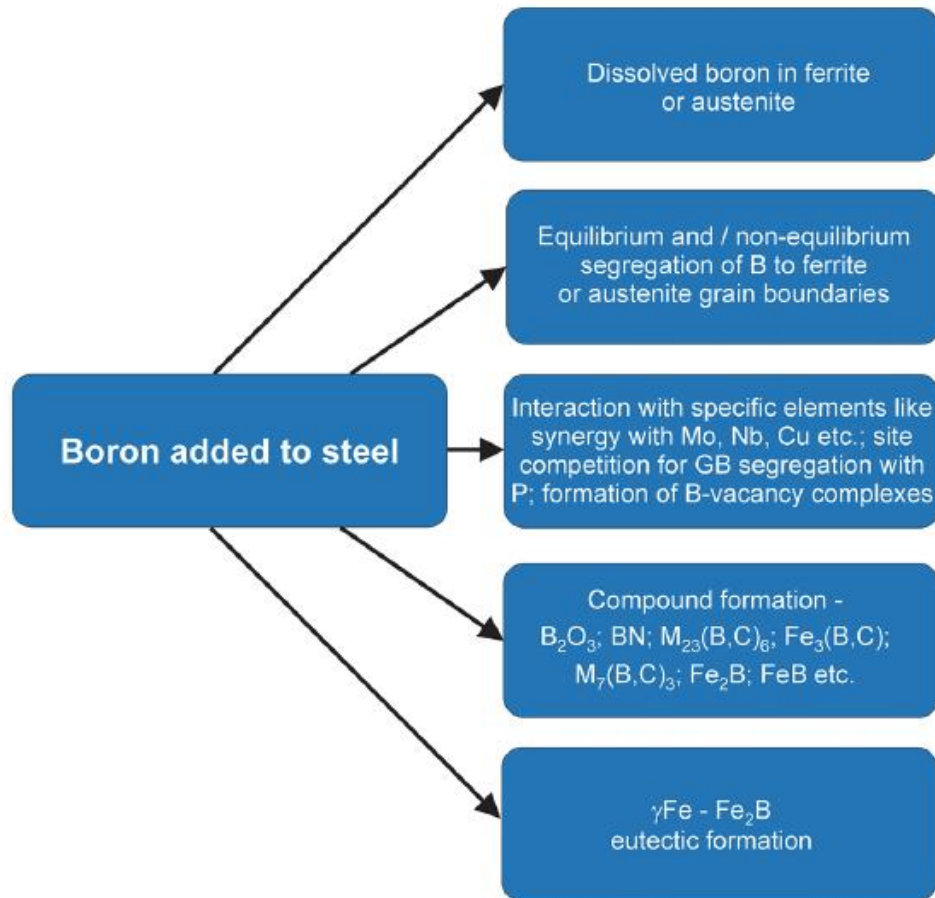
05 กลไกของ Boron ต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของเหล็กกล้า

กลไกของ Boron ต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของเหล็กกล้า

Steels/materials	Observed or envisaged benefits	Typical boron content [wt%]
Through-hardening heat-treatable steels	Enhance hardenability, thereby improve mechanical properties	0.0004–0.0070
Case-hardening steels	Enhance hardenability, improve toughness	0.0010–0.0030
Press-hardening steels	Enhance hardenability so as to attain ultrahigh ultimate tensile strengths (UTS)	0.0020
Wire rod steels	Reduce strain aging due to nitrogen, thus reduce work hardening, improve ductility, formability, torsional ductility	0.0010–0.0060
Cold-upsetting/cold-forging steels	Improve toughness at low temperatures (-60 to -80°C)	0.0020–0.0040
Ferritic stainless steel	Improve surface quality of stainless strips	0.0005–0.0050
Austenitic stainless steel	Improve high-temperature strength	0.0100
High strength interstitial-free steels	Avoid secondary work embrittlement	0.0003–0.0040
Creep-resistant steels	Improve creep strength	0.0010–0.0140
Ni-based superalloys	Improve creep rupture life	0.0030–0.0250
Eutectic Fe–B alloys	Impart wear resistance	0.8–2.6
Fe–12 Mn alloys and Fe–9 Mn steels	Improve toughness	0.0010–0.0030
Ni ₃ Al intermetallics	Improve the bonding strength in sintered intermetallics	0.05–0.4

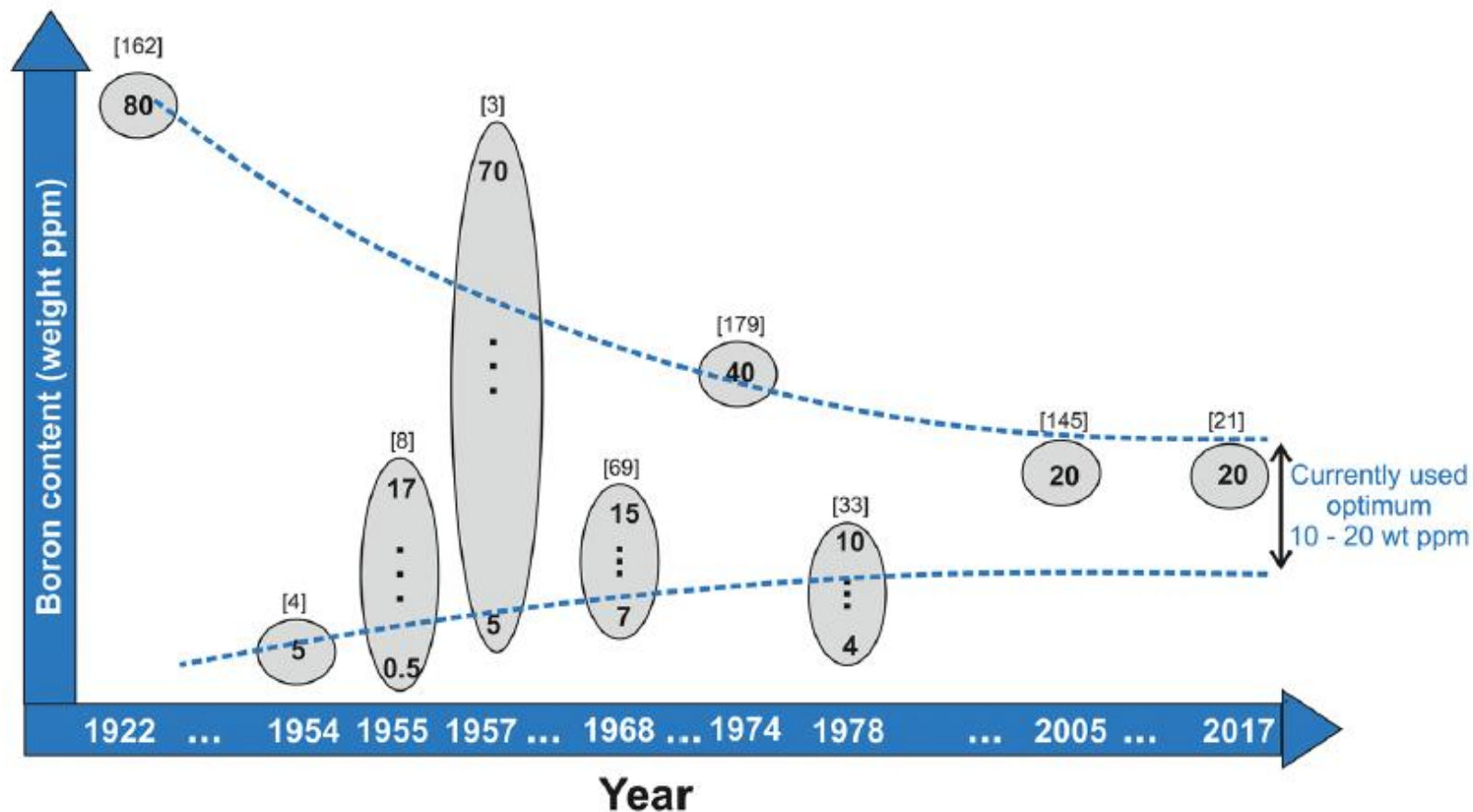
รูปที่ 22 การใช้งาน Boron กับโลหะชนิดต่างๆ

กลไกของ Boron ต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของเหล็กกล้า



รูปที่ 23 สถานะภาพต่างๆของ Boron ในเหล็กกล้า

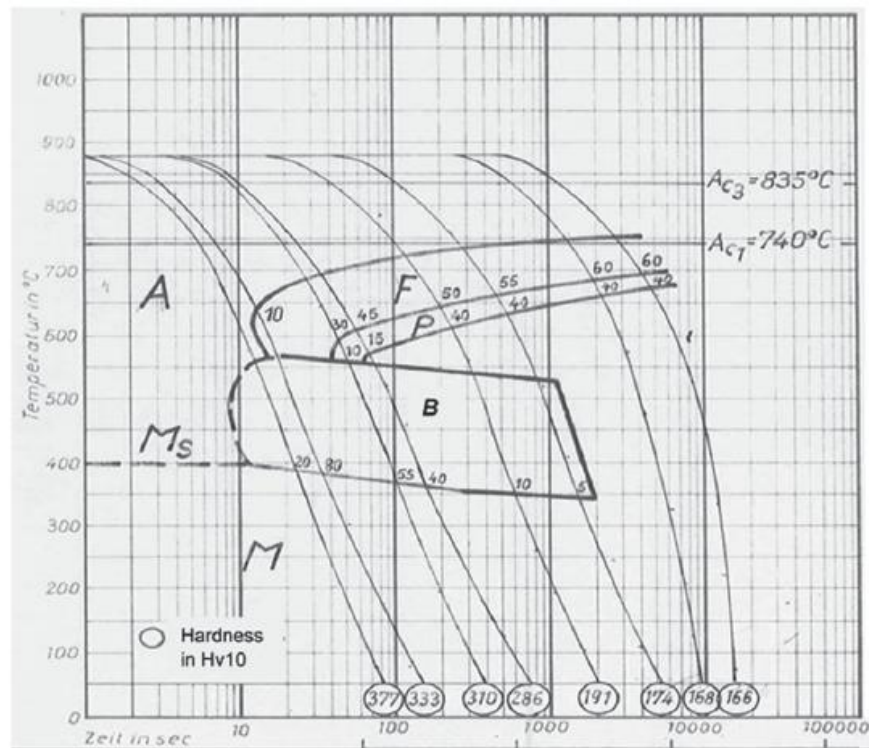
กลไกของ Boron ต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของเหล็กกล้า



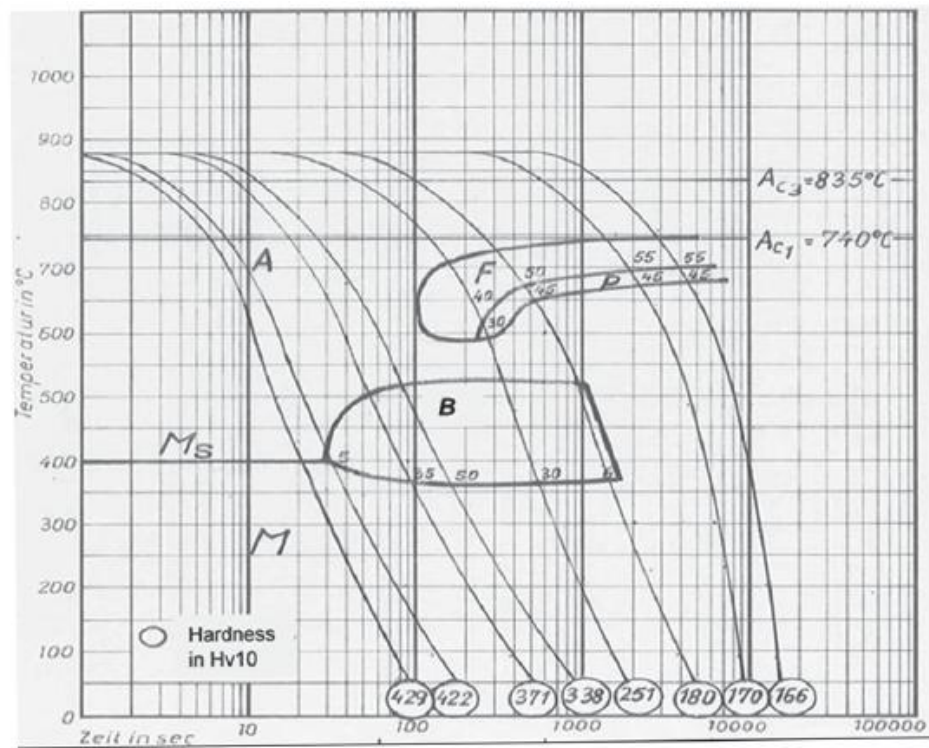
รูปที่ 24 ปริมาณการใช้งานของ Boron ในเหล็กกล้าชุบแข็ง

กลไกของ Boron ต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของเหล็กกล้า

DIN 20MnCr5 without Boron

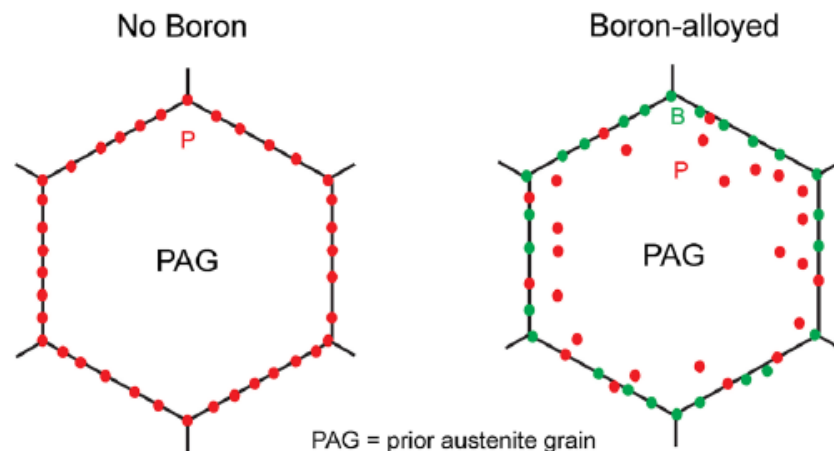
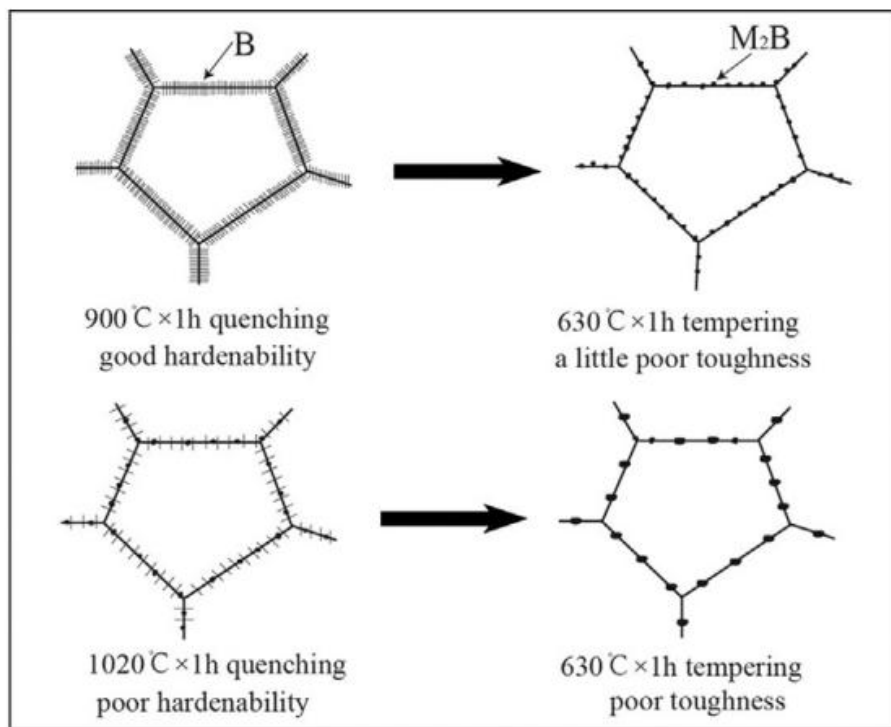


DIN 20MnCr5 + 29ppm of Boron



รูปที่ 25 ผลของการเติม Boron ต่อการเปลี่ยนแปลงเฟสของออสเทนไนต์เมื่อเย็นตัวต่อเนื่อง
ในเหล็กกล้า DIN 20MnCr5

กลไกของ Boron ต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของเหล็กกล้า

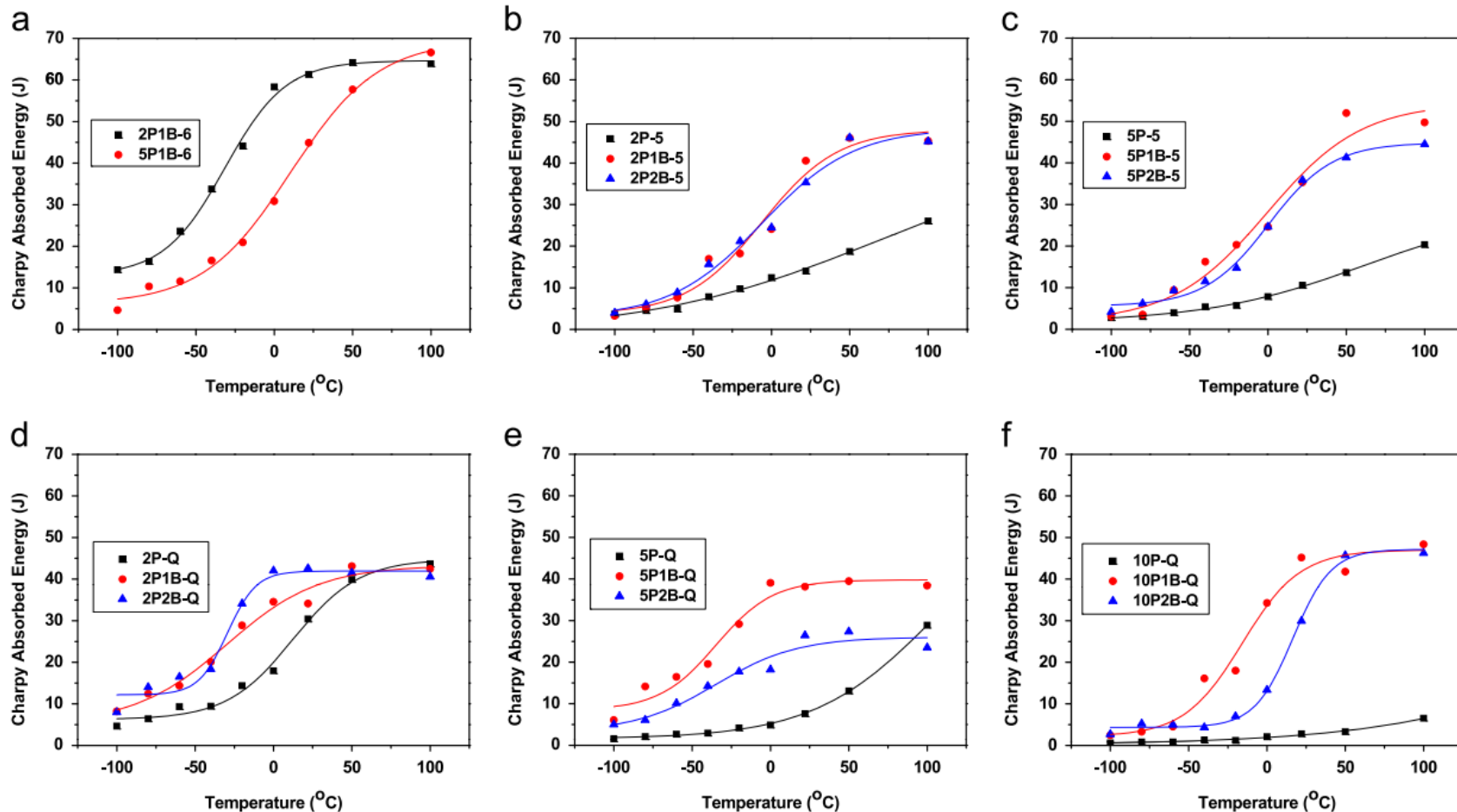


รูปที่ 26 การแยกตัวของ Boron บริเวณของเกรนออสเทนไนต์และความแกร่งของเหล็กกล้า

Zheng, Yaxu, et al. "Dissolution and precipitation behaviors of boron bearing phase and their effects on hardenability and toughness of 25CrMoNbB steel." *Materials Science and Engineering: A* 701 (2017): 45-55.

Sharma, Mamta, Isabell Ortlepp, and Wolfgang Bleck. "Boron in heat-treatable steels: a review." *steel research international* 90.11 (2019): 1900133.

กลไกของ Boron ต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของเหล็กกล้า



รูปที่ 27 ผลของการเติม Boron ต่อความสามารถในการรับแรงกระแทกของเหล็กกล้า

ขอขอบคุณ

CHULA Σ ENGINEERING
Innovation toward Sustainability | ACTN#W

