

การดูดกลืนพลังงานในเหล็กหล่อเทา*

สุธีระ ประเสริฐสรณ์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

1. บทนำ

ความสามารถในการดูดกลืนพลังงานของวัสดุวิศวกรรมได้สังเกตพบมานานแล้วตั้งแต่ราวศวรรษที่ 20-50^(1,2,3,4) และได้มีการประยุกต์ใช้งาน⁽⁵⁾ ตั้งแต่นั้นมาตลอดจนได้มีความพยายามคิดค้นโลหะผสมใหม่ ๆ เพื่อให้มีคุณสมบัติเหมาะสมทั้งทางวิศวกรรม (strength, toughness) และการดูดกลืนพลังงาน (damping) โลหะที่ใช้กันส่วนมากคือโลหะผสมของแมงกานีสและทองแดง ซึ่งรู้จักกันในชื่อการค้าว่า Sonoston^(6,7,8)

เหล็กหล่อเทาเป็นที่รู้จักกันดีว่า มีคุณสมบัติดูดกลืนพลังงานจากการสั่นสะเทือน (vibrational energy) ได้ดี และถูกใช้อย่างกว้างขวางเป็นฐานเครื่องจักร (machine foundation) ที่มีการสั่นสะเทือนมาก การดูดกลืนพลังงานสั่นสะเทือนปรากฏอยู่ในรูป hysteresis ของ stress และ strain เมื่อวัสดุได้รับ cyclic load พื้นที่ของ hysteresis loop คือ พลังงานที่ถูกดูดกลืนต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุ (specific damping energy, SDE)

การศึกษาถึงคุณสมบัติการดูดกลืนพลังงานของเหล็กหล่อได้ทำกันอย่างกว้างขวาง^(9, 10, 11, 12, 13) ทฤษฎีต่าง ๆ ถูกเสนอและรวบรวมอย่างค่อนข้างสมบูรณ์มาตั้งแต่ทศวรรษที่ 60⁽¹⁴⁾ ถึงแม้ว่าจะมีการเสนอทฤษฎีของกลไกการดูดกลืนพลังงาน (damping mechanism) มากกว่า 20 กลไก แต่สำหรับเหล็กหล่อเชื่อว่าสาเหตุของการดูดกลืนพลังงานคือ คุณสมบัติ magnetoelastic ของวัสดุ ferromagnetic⁽¹⁴⁾ และ plastic strain ที่เกิดเนื่องจากความไม่สมบูรณ์ในเนื้อโลหะ (ในระดับ microscopic) และเป็นที่เชื่อกันว่าการดูดกลืนพลังงานเกิดในเกล็ดกราไฟท์ และ matrix ไม่มีบทบาทเลย^(10, 12) บทความนี้รายงานการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของ microstructure ของเหล็กหล่อเทาขณะรับ cyclic load และใช้อธิบายกลไกของการดูดกลืนพลังงาน

*เอกสารเสนอในที่ประชุมวิชาการวิศวกรรมเครื่องกล ครั้งที่ 3 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ หาดใหญ่ วันที่ 18-19 พฤษภาคม 2532

2. Microstructure ของตัวอย่างทดสอบ

การทดสอบในรายงานนี้มี 2 ประเภท คือ การทดสอบเพื่อหาความสามารถในการดูดกลืนพลังงาน เมื่อมีภาระใน 2 ทิศทาง (biaxial stress) และการทดสอบเพื่อศึกษาหาความเปลี่ยนแปลง microstructure เมื่อมี cyclic load

2.1 องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นทดสอบ

เหล็กหล่อเทาที่ใช้ทดสอบในชิ้นแรกมี 3 ชนิด ซึ่งใช้อักษรย่อแทนด้วย CI1, CI2 และ CI3 เหล็กหล่อทั้งสามมีองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นทดสอบ %

องค์ประกอบ %	CI1	CI2	CI3	CI4 และ CI5*
Fe	93.7	94.7	93.3	93.4
C	3.39	2.99	3.57	4.01
Si	1.75	1.59	2.20	0.96
B	0.001	0.0003	0.001	-
Mn	0.719	0.545	0.603	0.600
S	0.092	0.042	0.100	0.100
Mg	0.003	0.002	0.002	-
Al	0.013	0.009	0.0095	-
Sn	0.005	0.007	0.006	-
Cr	0.039	0.034	0.035	-
Ni	0.033	0.034	0.038	-
Cu	0.203	0.048	0.084	-
P	0.018	0.032	0.023	0.100
Mo	0.013	0.010	0.003	0.820
Cast Temp (°C)	1485	1570	1450	N/A
Carbon equivalent	4.00	3.37	4.15	4.36

*สำหรับ CI4 และ CI5 ใช้ทดลองเพื่อศึกษาบทบาทของ matrix ในหัวข้อที่ 6.

2.2 Microstructure

จาก microstructure ในรูป 1-3 โครงสร้างภายในของเหล็กหล่อทั้ง 3 สรุปได้ดังนี้

CI1 : โครงสร้างประกอบด้วยเกล็ดกราไฟท์แบบ A (type A graphite flake) ใน matrix แบบ pearlite โดยมีโครงสร้าง ferrite พอสังเกตเห็นได้ใกล้ ๆ เกล็ดกราไฟท์ ขนาดของเกล็ดกราไฟท์ไม่สม่ำเสมอ และมี MnS inclusion เล็กน้อย

CI2 : โครงสร้างประกอบด้วยเกล็ดกราไฟท์แบบ A โดยมี matrix เป็น pearlite และพอสังเกตเห็น ferrite ในบางส่วนของ pearlite

CI3 : โครงสร้างเช่นเดียวกับ CI2 และมี MnS inclusion

โดยสรุปเหล็กหล่อทั้ง 3 มีโครงสร้างของ matrix เหมือนกัน (เป็น pearlitic cast iron) แต่มีขนาดของเกล็ดกราไฟท์ต่างกัน กล่าวคือ CI1 ประกอบด้วยเกล็ดขนาดใหญ่ กลาง และเล็ก คละกันไป CI2 มีเกล็ดขนาดเล็กและมีความหนาแน่น (density) ใกล้เคียงกับ CI1 ในขณะที่ CI3 ประกอบด้วยเกล็ดขนาดใหญ่ และกลาง กระจัดกระจายไปทั่วและมีความหนาแน่นมากกว่า CI1 และ CI2 ดังนั้น การศึกษาความสามารถดูดกลืนพลังงาน ล้นสะท้อนของเหล็กหล่อเทาทั้ง 3 จึงสามารถบอกอิทธิพลของเกล็ดกราไฟท์ที่มีต่อคุณสมบัติ การดูดกลืนพลังงานได้

3. คุณสมบัติการดูดกลืนพลังงานของเหล็กหล่อเทา

3.1 วิธีทดลอง

เหล็กหล่อเทาทรงกระบอกตันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางถูกกลึงให้เป็นทรงกระบอกผนังบาง มีหน้าแปลนที่ปลายทั้งสองข้าง ชิ้นงานวางอยู่ใน loading block ที่สามารถให้แรงอัดน้ำมันได้ 3 chamber คือ external, internal และ end chamber (ใช้ electrohydraulic servo valve) ดังรูปที่ 4 ด้วยการปรับความดัน และ phase ของน้ำมันในทั้ง 3 chamber ทำให้เราได้ biaxial stress บนผิวชิ้นงาน ซึ่งมีอัตราส่วนของ principal stress ตั้งแต่ -1 ถึง +1 Stress สูงสุดในการทดลองคือ

60 MPa ข้อมูลที่บันทึกคือ ระดับความดันน้ำมันใน 3 chamber และ strain ใน 2 ทิศทาง (hoop, axial) ซึ่งบันทึกโดยใช้ pressure transducer และ strain gauge ข้อมูลทั้ง 5 (3 pressure และ 2 strain) ถูก digitized โดย microcomputer แล้วเก็บใน disk เพื่อการวิเคราะห์ต่อไป

3.2 ผลการทดลอง

จากการศึกษาของทีมงานวิจัยต่าง ๆ ได้ข้อสรุปว่า พลังงานที่ถูกดูดกลืนในวัสดุวิศวกรรม (engineering material) เขียนเป็นสมการ (phenomenological expression) ได้ดังนี้

$$U = JX^n$$

เมื่อ U = Specific damping energy (ผลรวมของพื้นที่ hysteresis loops ใน principal directions)

X = Loading parameter

J = Material constant

n = Damping exponent

Loading parameter เป็นตัวประกอบที่เนื่องมาจากภาวะของชิ้นงาน เช่น maximum normal stress (strain), maximum shear stress (strain), distortional stress (strain) (energy), dilatational stress (strain) (energy), และ total strain energy ในการทดลองแบบแรงในทิศทางเดียว (uniaxial stress) มักจะใช้ loading parameter เป็น maximum normal stress หรือ strain⁽¹⁴⁾ แต่ในกรณีของ biaxial stress ซึ่งยังไม่มีรายงานที่สรุปได้แน่นอนว่า loading parameter ควรเป็นอะไรนั้น เป็นที่เชื่อว่าควรใช้ parameter ที่แสดงภาพรวมของ multiaxial stress ผลการทดลองพบว่า พลังงานดูดกลืนจำเพาะทั้งหมด (total SDE) สามารถ fit ได้ดีกับสมการเมื่อใช้ total strain energy เป็น loading parameter⁽¹⁵⁾ ผลการทดลองพอจะสรุปความสามารถในการดูดกลืนพลังงานจากน้อยไปหามาก คือ CI2, CI1 และ CI3 ตามลำดับ ตัวอย่างเช่นที่ total strain energy 40 kNm/m³ จะได้ SDE เรียงตามลำดับดังนี้ 4.48, 7.64 และ 12.42 kNm/m³

4. การศึกษากลไกการดุดกลืนพลังงานของเหล็กหล่อ

Fox และ Adams ได้ศึกษาถึงกลไกการดุดกลืนพลังงาน⁽¹²⁾ โดยทดลองกับเหล็กหล่อที่มี microstructure ต่างๆ กัน เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถดุดกลืนพลังงานกับ microstructure และได้ข้อสรุปว่าสำหรับเหล็กหล่อพลังงานส่วนมากสูญเสียไปในกราฟไฟท์ และ matrix ไม่มีบทบาทในการดุดกลืนพลังงานเลย ข้อสรุปของ Fox และ Adams ได้หักล้างความเชื่อดั้งเดิมที่ว่าเหล็กหล่อดุดกลืนพลังงานโดยการเกิด microplastic ใน matrix กันเนื่องมาจาก stress concentration ตามบริเวณปลายแหลมของเหล็กกราฟไฟท์ อย่างไรก็ตามการศึกษาของ Fox และ Adams ก็ได้ตรวจสอบกับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริงใน microstructure

กลไกในการดุดกลืนพลังงานเท่าที่ได้รับการศึกษากัน ส่วนมากเน้นทางปริมาณ (quantity) มากกว่าคุณภาพ (quality) กล่าวคือ เป็นการศึกษาในระดับมหภาค (macroscopic level) แต่กลไกการดุดกลืนจริงจะเกิดในระดับจุลภาค (microscopic level) ดังนั้น เพื่อจะศึกษาให้ถึงกลไกการดุดกลืนพลังงานจึงได้ศึกษาพฤติกรรมของ microstructure เมื่อมี cyclic load มากระทำ

4.1 วิธีการทดลอง

ได้ออกแบบและสร้างเครื่องมือที่ให้ cyclic load แก่ชิ้นทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 5 ภาระที่ชิ้นทดสอบรับได้จากแรงดึงและแรงผลักที่ส่งผ่านสกรูส่งกำลัง วัดขนาดแรงโดยใช้ load cell ที่ตรึงปลายข้างหนึ่งของชิ้นทดสอบ เครื่องมือนี้ติดตั้งบนกล้องจุลทรรศน์ซึ่งมีกล้องถ่ายรูปเพื่อเก็บภาพตามขั้นตอนที่กำหนด ภาพถ่ายที่ได้จะแสดงถึงขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับ microstructure ของชิ้นทดสอบ

4.2 ผลการทดลอง

การศึกษาโดยวิธีนี้ ผู้ศึกษาไม่มีโอกาสทราบล่วงหน้าว่าความเปลี่ยนแปลงของ microstructure จะเกิดขึ้นเมื่อใดและตำแหน่งใด การถ่ายภาพบันทึกภาพด้วยเครื่องวัดทัศนก็มิอาจทำได้โดยง่ายเพราะเป็นการถ่ายในระดับจุลภาคที่มีการเคลื่อนที่ตลอดเวลา (cyclic stress) จึงจำเป็นต้องบันทึกภาพหนึ่งให้มากที่สุดในช่วงของ stress history และตำแหน่งของ microstructure เพื่อให้ติดตามการเปลี่ยนแปลงได้ตลอดจึงต้องถ่ายภาพ ณ

ตำแหน่งเดียวกันในทุกกรณี (ซึ่งทำไม่ได้ง่ายนักในระดับจุลภาคที่มีการเคลื่อนที่เนื่องจาก strain และการ yield) การทดลองนี้ได้บันทึกภาพไว้กว่า 300 ภาพ แต่เพื่อความกระชับบทความนี้จะเสนอเพียงภาพที่ได้จากการศึกษา CI1 เพราะเป็นกรณีที่ให้ข้อสรุปที่ดีที่สุด

4.2.1 การเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างของ CI1

รูปที่ 6 แสดงโครงสร้างภายในของชิ้นงาน CI1 ก่อนจะถูกภาระกระทำ ในภาพแสดงการอยู่รวมกันของเกล็ดกราไฟท์ pearlite และ ferrite matrix (สีขาว) เมื่อทดลองถึงขั้นทดสอบที่ 60 MPa ไม่ปรากฏการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างให้เห็น แต่เมื่อได้ให้ cyclic stress ± 20 MPa จำนวน 1000 รอบ จะปรากฏการเปลี่ยนแปลงขึ้นดังรูปที่ 7 ซึ่งจะเห็นว่าเกล็ดกราไฟท์เสียหาย การทดลองดำเนินต่อไปที่ ± 20 MPa จนครบ 3000 รอบ แล้วจึงเพิ่มขึ้นเป็น ± 40 MPa และที่ 1000 รอบ จะพบว่าเกล็ดกราไฟท์เสียหายมากขึ้น และจะเริ่มสังเกตเห็น slip band ใน ferrite ที่ปลายเกล็ดกราไฟท์ดังรูปที่ 8 เมื่อเพิ่มภาระต่อไปจนถึง 3000 รอบ พบว่า slip band ขยายตัวชัดเจนขึ้นดังรูปที่ 9 และเมื่อเพิ่มภาระเป็น ± 60 MPa ที่ 1000 รอบ จะเห็นทั้ง intergranular และ transgranular crack ใน ferrite matrix ชัดเจนขึ้น รอยแยกนี้ทั้งที่ขยายตัวตามแนว slip band และอยู่นอกแนวดังรูปที่ 10 ภาพเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานบริสุทธิ์ (virgin) และเมื่อรับภาระจนถึง ± 60 MPa, 3000 รอบ แสดงอยู่ในรูปที่ 11

4.2.2 การเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างของ CI2

ในการทดลองจะสังเกตเห็นรอยแยกในเกล็ดกราไฟท์ เมื่อมีภาระ ± 20 MPa 1000 รอบ และขนาดของรอยแยกจะคงที่ แม้จะเพิ่มภาระขึ้นเป็น ± 20 MPa 3000 รอบ ± 40 MPa 3000 รอบ และ ± 60 MPa 3000 รอบ ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าสำหรับเหล็กหล่อชนิดนี้ เมื่อเริ่มเกิดรอยแยกที่ภาระระดับหนึ่งแล้ว ขนาดของรอยแยกจะคงที่ถึงแม้จะเพิ่มภาระเพิ่มขึ้นเป็น 2 และ 3 เท่า

4.2.3 การเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างของ CI3

ได้สังเกตเห็นรอยแยกในชิ้นทดสอบบริสุทธิ์ (virgin material) ซึ่งแสดงว่าเหล็กหล่อชนิดนี้มีโครงสร้างของกราไฟท์ค่อนข้างอ่อนแอ และเกิดรอยแยกได้ง่ายในกระบวนการผลิตชิ้นทดสอบ ความเสียหายของเกล็ดกราไฟท์สังเกตพบที่ ± 20 MPa 1000 รอบ ความเสียหายปรากฏรุนแรงขึ้นที่ 3000 รอบ และเมื่อมีภาระถึง ± 40 MPa 3000 รอบ พบว่า

รอยแยกขยายตัวออกจากเกล็ดกราไฟท์ไปยัง matrix แล้วเชื่อมต่อกับรอยแยกในเกล็ดกราไฟท์อื่น ๆ ดังภาพเปรียบเทียบแสดงในรูปที่ 12 การทดลองต่อไปพบว่ารอยแยกเหล่านี้คือ fracture path นั้นเอง

5. ข้อสรุปใหม่ของกลไกการดูดกลืนพลังงานในเหล็กหล่อเทา

จากการศึกษาของ Fox และ Adams เมื่อ 20 ปีที่ผ่านมา ได้ข้อสรุปค่อนข้างแน่ชัดว่า กลไกการดูดกลืนพลังงานในเหล็กหล่ออยู่ที่กราไฟท์ และ matrix ไม่มีบทบาทแต่อย่างใด แต่การศึกษาในรายงานนี้พบข้อขัดแย้งว่า matrix ก็มีอิทธิพลต่อความสามารถดูดกลืนพลังงานของเหล็กหล่อเทา เพราะปรากฏการณ์ slip band ที่พบในชิ้นทดสอบ CI1 เป็นปรากฏการณ์ของ plastic flow ซึ่งพลังงานไม่อาจย้อนคืนได้ หรืออีกนัยหนึ่ง การเกิด และการขยายตัวของ slip band คือ การดูดกลืนพลังงานนั่นเอง ผลที่ตามมาคือ รอยแยกยิ่งยาวมากขึ้นและโอกาสที่ผิวหน้าทั้งสองของรอยแยกจะเสียดสีกันเอง เมื่อมี cyclic load ย่อมมากขึ้นด้วย และหมายถึงพลังงานสูญเสียมากขึ้น

การที่รอยแยกขยายตัวเข้าไปใน matrix ได้นั้น โครงสร้างของ matrix ต้องเอื้ออำนวยให้เกิดด้วย โครงสร้างของ pearlite ประกอบด้วยชั้น (layer) ของโครงสร้างที่แข็งของเหล็กคาร์ไบด์ และอ่อน (ferrite) การขยายตัวของรอยแยกจึงเป็นไปได้ด้วยความลำบาก ในทางตรงกันข้าม ferrite เป็นโครงสร้างที่อ่อนและแกรนพยาย โอกาสที่จะเกิด deformation และการขยายตัวของรอยแยกจึงง่าย ดังนั้น เราจะคาดการณ์ได้ว่า ถ้าโครงสร้างของ matrix ส่วนมาก หรือทั้งหมดเป็น ferrite เกล็ดกราไฟท์ก็จะต้องรับ strain มากกว่าในกรณีที่ matrix เป็น pearlite (ทั้งนี้อยู่ภายใต้ข้อสมมุติที่ว่าผิวสัมผัสของกราไฟท์ และ matrix ไม่แยกจากกัน ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า รอยแยกจะเกิดในกราไฟท์ไม่ใช่ที่ผิวสัมผัส) เมื่อกราไฟท์เสียหายมากไม่มีความต่อเนื่องของเนื้อวัสดุอีกต่อไป และไม่สามารถรับภาระได้อีกต่อไป เกล็ดกราไฟท์จะทำหน้าที่เหมือนช่องว่าง (void) ใน matrix ซึ่งทำให้เกิด stress concentration ใน matrix และชักนำให้เกิด plastic deformation และรอยแยก และการดูดกลืนพลังงานในที่สุด

เป็นที่สังเกตว่าการเสียหายของ microstructure ทั้งคุณภาพและปริมาณ (qualitative & quantitative) สัมพันธ์กับความสามารถดูดกลืนพลังงานดังข้อมูลแสดงในหัวข้อ 3.2

6. การทดลองเพื่อยืนยันบทบาทของ matrix

จากการทดลองในข้อ 4 และ 5 ถึงแม้จะได้ข้อสมมุติฐานใหม่ว่า matrix มีบทบาทในการดูดกลืนพลังงานของเหล็กหล่อเทา แต่ก็หาได้มีหลักฐานที่ชัดเจนไม่ ดังนั้น เพื่อตรวจสอบข้อเสนอนี้ใหม่เกี่ยวกับกลไกการดูดกลืนพลังงาน จึงควรทดสอบวัสดุที่มาจากเบ้าหล่อเดียวกัน (มีองค์ประกอบทางเคมีเหมือนกัน) แต่มี matrix ต่างกัน ซึ่งทำได้โดยขบวนการ heat treatment ขึ้นทดสอบ 2 ขึ้นทำจากเหล็กหล่อแท่งเดียวกัน แต่อีกขึ้นหนึ่งผ่านขบวนการความร้อนจน matrix มีโครงสร้างเปลี่ยนไป แต่ยังคงลักษณะเดิมของเกล็ดกราไฟท์ไว้ รายละเอียดองค์ประกอบทางเคมีของขึ้นทดสอบทั้งสองแสดงอยู่ในตารางที่ 1 และมีรายละเอียดทางโครงสร้างดังนี้

CI4 : เป็นเหล็กหล่อที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนและ โมลิบดีนัมสูง โครงสร้างเป็นเกล็ดกราไฟท์แบบ A กระจายอยู่ใน matrix ที่ประกอบด้วย 95% pearlite และ 5% bainite ดังรูปที่ 13

CI5 : เป็นเหล็กหล่อชนิดเดียวกับ CI4 แต่อบคลายตัวที่ 850°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นในเตาอบ ทำให้โครงสร้างของกราไฟท์คงเดิม แต่ matrix เปลี่ยนไปเป็น 80% ferrite และ 20% pearlite ดังรูปที่ 14

จากการทดสอบโดยวิธีเดียวกับ CI1-CI3 ในหัวข้อที่ 3 พบว่าที่ total strain energy 40 kNm/m³ CI4 และ CI5 มี specific damping energy 11.85 และ 45.17 kNm/m³ ตามลำดับ จะเห็นว่า CI4 ซึ่งมี matrix เช่นเดียวกับ CI1-CI3 จะมีความสามารถดูดกลืนพลังงานในระดับใกล้เคียงกับ CI1-CI3 แต่ CI5 ซึ่งเป็นเหล็กหล่อ ferretic สามารถดูดกลืนพลังงานได้ถึง 4 เท่าของเหล็กหล่อ pearlitic

ผลการทดลองนี้สนับสนุนสมมุติฐานในเรื่องกลไกการดูดกลืนพลังงานที่เสนอนี้ในหัวข้อ 5 ได้เป็นอย่างดี ความสามารถดูดกลืนพลังงานของเหล็กหล่อเทาทั้ง 5 ชนิด แสดงอยู่ในรูปที่ 15

7. สรุป

จากการตรวจสอบเอกสารย้อนหลัง 10 ปี ใน Metal abstract ในหัวข้อ Grey Cast Iron และ Crack Initiation ไม่ปรากฏรายงานการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของ microstructure เมื่อรับภาระแบบ cyclic เลย การทดลองนี้ จึงเป็นครั้งแรกที่เปิดเผยถึงปรากฏการณ์เสียหายใน microstructure ของเหล็กหล่อเทาเมื่อมี cyclic stress

จากการทดลองเราได้ข้อสรุปว่า สำหรับเหล็กหล่อเทาในระยะแรกของการรับภาระพลังงานจะถูกดูดกลืนโดย plastic deformation ในเกล็ดกราไฟท์ ต่อเมื่อจำนวนรอบของภาระเพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดรอยแยกขึ้นในเกล็ดกราไฟท์ และมี dislocation ใหม่ ๆ เกิดขึ้นที่ปลายรอยแยก ทำให้รอยแยกขยายตัวพร้อมกับดูดกลืนพลังงานในกระบวนการ plastic flow พลังงานส่วนหนึ่ง จะสูญเสียไปในการกำเนิดพื้นผิวของรอยแยกตามทฤษฎีของกลศาสตร์การแตกหัก (fracture mechanics) เมื่อเกล็ดกราไฟท์เสียหายจนหมดสิ้นพลังงานจะสูญเสียจากการถูดของผิวทั้งสองของรอยแยก โดยเฉพาะในช่วง compressive stress การคราก (yield) อาจขยายตัวเข้าสู่ matrix ถ้าสถานการณ์อำนวย (เช่น ferritic matrix) และพลังงานก็จะถูกดูดกลืนมากขึ้น (เช่น CI5) ขนาดและรูปร่างของเกร็ดกราไฟท์ และการเปลี่ยนแปลง microstructure ภายใต้ภาระแบบพลศาสตร์ สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถในการดูดกลืนพลังงานได้ โครงสร้างที่มีเกล็ดกราไฟท์หยาบ (เช่น CI1, CI3, CI4) หรือมีจำนวนกราไฟท์อยู่มาก (เช่น CI3, CI4) จะดูดกลืนพลังงานได้มาก ส่วนเหล็กหล่อที่ภาระแบบพลศาสตร์ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง microstructure อย่างเด่นชัด จะมีการดูดกลืนพลังงานน้อย (เช่น CI2) การทดลองกับเหล็กหล่อที่มี matrix ต่างกัน ได้ยืนยันข้อเสนอนี้ใหม่ว่า matrix ของเหล็กหล่อมักมีบทบาทอย่างมากในการดูดกลืนพลังงานสิ้นสະເກືອນ

เอกสารอ้างอิง

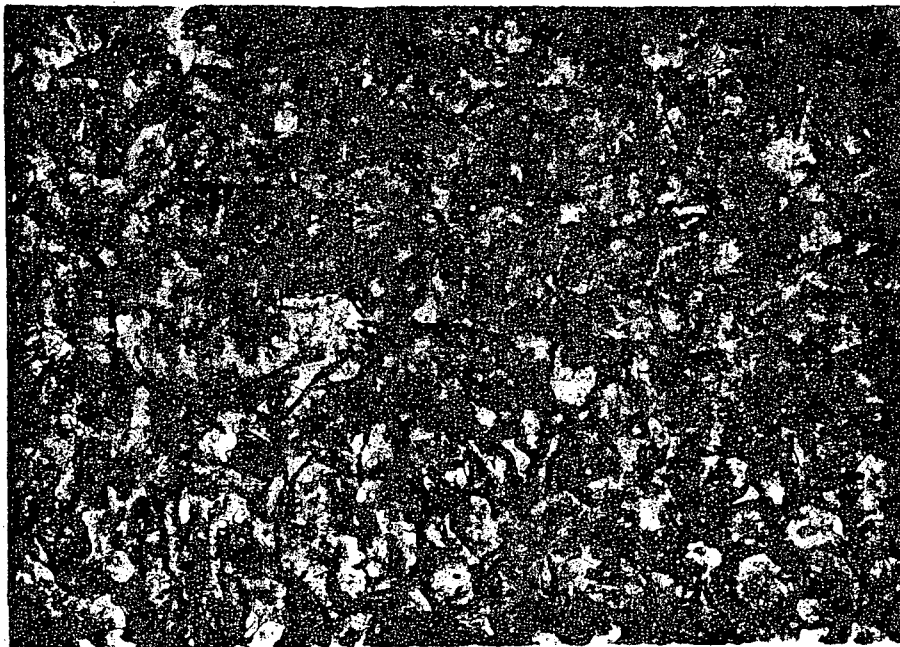
1. Cochardt, A.W. "The origin of damping in high-strength ferromagnetic alloys" J. App. Mech., 20, 1953, pp.196-220, 574-575.
2. Foppl, O. "The practical importance of the damping capacity of metals, especially steels." J. Iron Steel Inst., 134, 1936, pp.393-455.

3. Robertson, J.M., Yorgiadis, A.J. "Internal friction in engineering materials" Trans A.S.M.E., 68, 1946, pp.A173-A182.
4. Kimball, A.I., Lovell, D.E. "internal friction in solids." Phys. Rev., 2 nd series, 30, 1927, pp.948-959.
5. Hague, F.T. "Superposed turbine blade research." Mech. Eng., 62, 1940, pp.275-277.
6. Goodwin, R.J. "Manganese-copper alloys of high damping capacity" Met. Sci. J., 2, 1968, pp. 121-128.
7. Greetham, G. "Manganese in copper alloys." Materiaux et techniques, Dec., 1977, pp.105-116.
8. Hedley J.A. "Manganese rich alloys." Metall. Mat. Tech., 12, 1980, pp.497-500.
9. Adams, R.D., Fox, M.A.O. "Measurement of the damping capacity and dynamics modulus of high-damping metals under direct cyclic stresses". J. Phys. D., 5, 1972, pp.1274-1283.
10. Adams, R.D., Fox, M.A.O. "Principal mechanisms of damping in cast irons." J. Iron Steel Inst., 211, 1973, pp.37-43.
11. Fox, M.A.O., Adams, R.D. "Prediction of the damping capacity of cast iron from the variation of its dynamics modulus with strain amplitude." J. Iron Steel Inst., 210, 1972, pp.527-530.
12. Fox, M.A.O., Adams, R.D. "Correlation of the damping capacity of cast iron with its mechanical properties and microstructure." J. Mech. Eng. Sci., 15, 1973, pp.81-94.

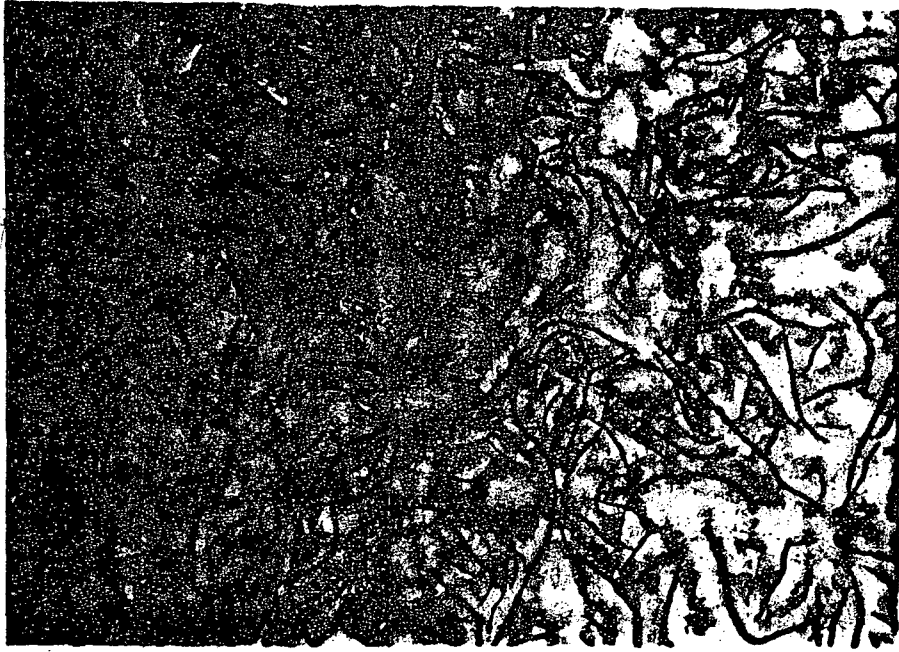
13. Plenard, E. "Cast iron damping capacity, structure and properties relation." Modern Casting, 41, 1962, pp.144-151.
14. Lazan, B.J. "Damping of materials and members in structural mechanics." Pergamon, Oxford, 1968.
15. Prasertsan, S. "Energy dissipation in materials under biaxial stress." Ph.D. thesis., Dept. Mech. Eng., University of Queensland, 1987.



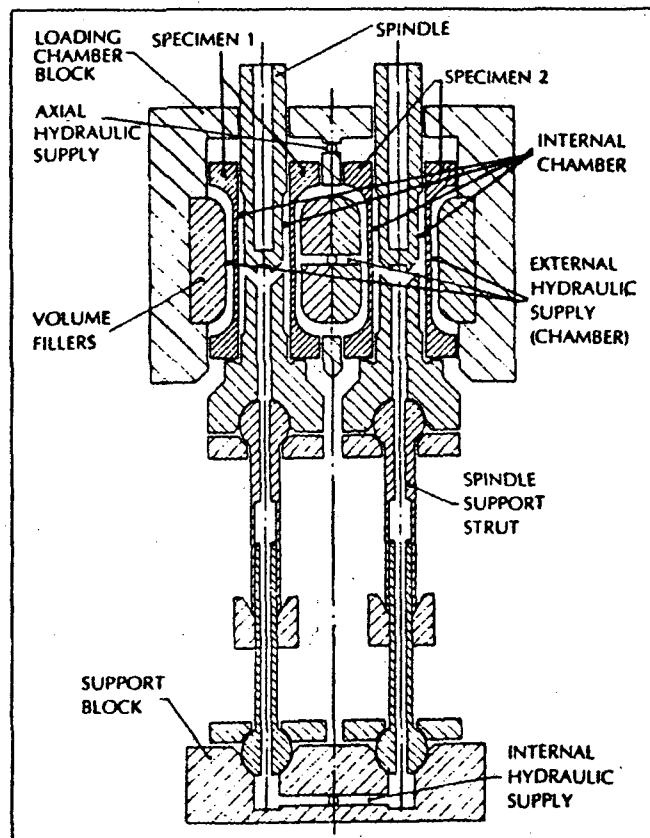
รูปที่ 1 Microstructure ของ CI1 (x 100)



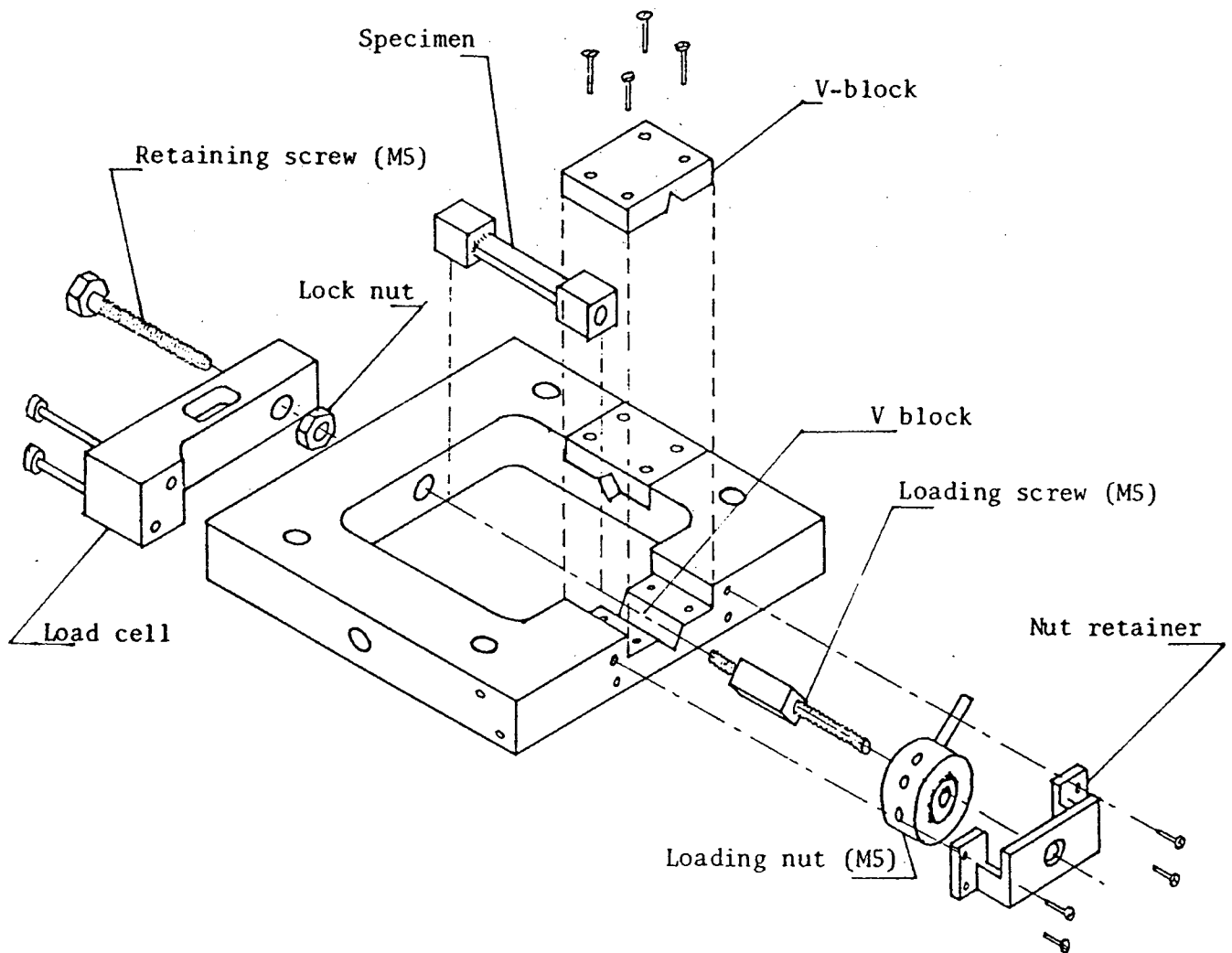
รูปที่ 2 Microstructure ของ CI2 (x 100)



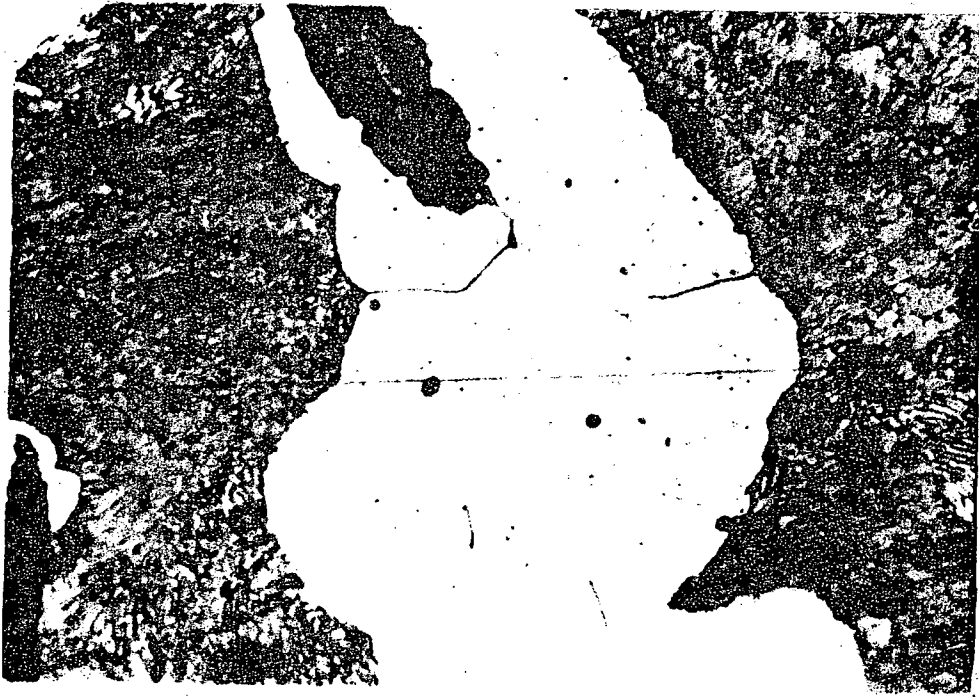
รูปที่ 3 Microstructure ของ CI3



รูปที่ 4 เครื่องมือและการจัดวางขึ้นทดสอบเพื่อทดลองหา SDE



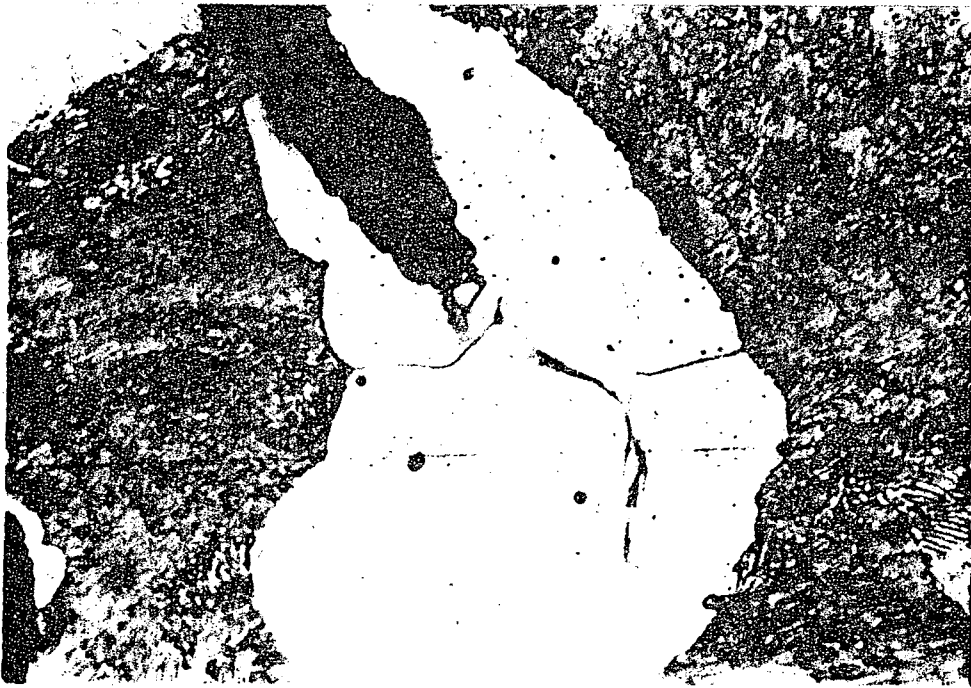
รูปที่ 5 เครื่องมือให้ภาระแก่ชิ้นทดสอบ microstructure



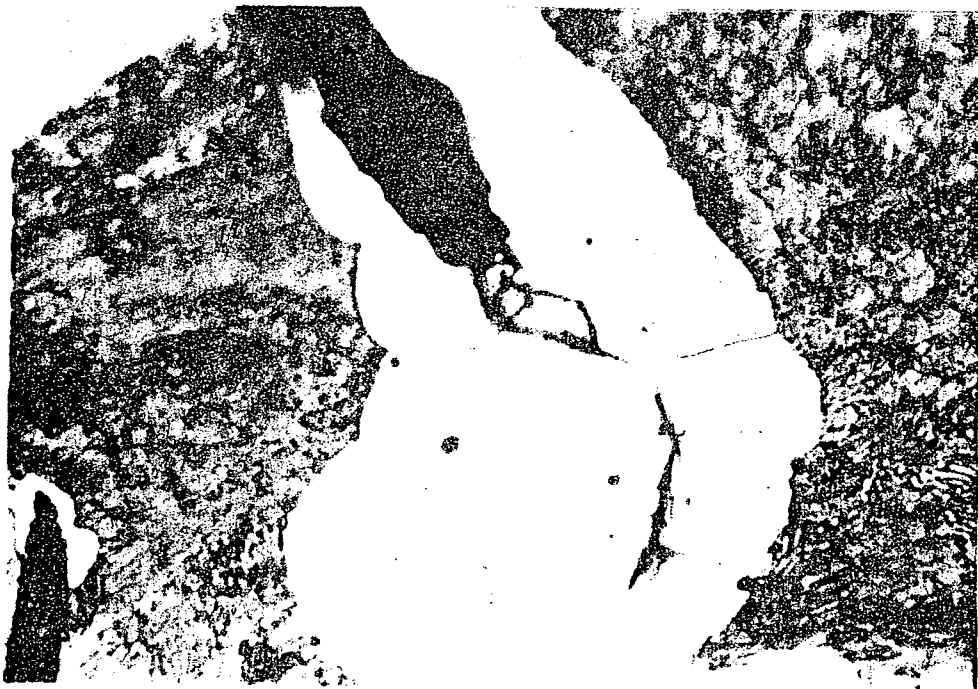
รูปที่ 6 Microstructure ของ CI1 ก่อนถูกการกระทำ (x 840)



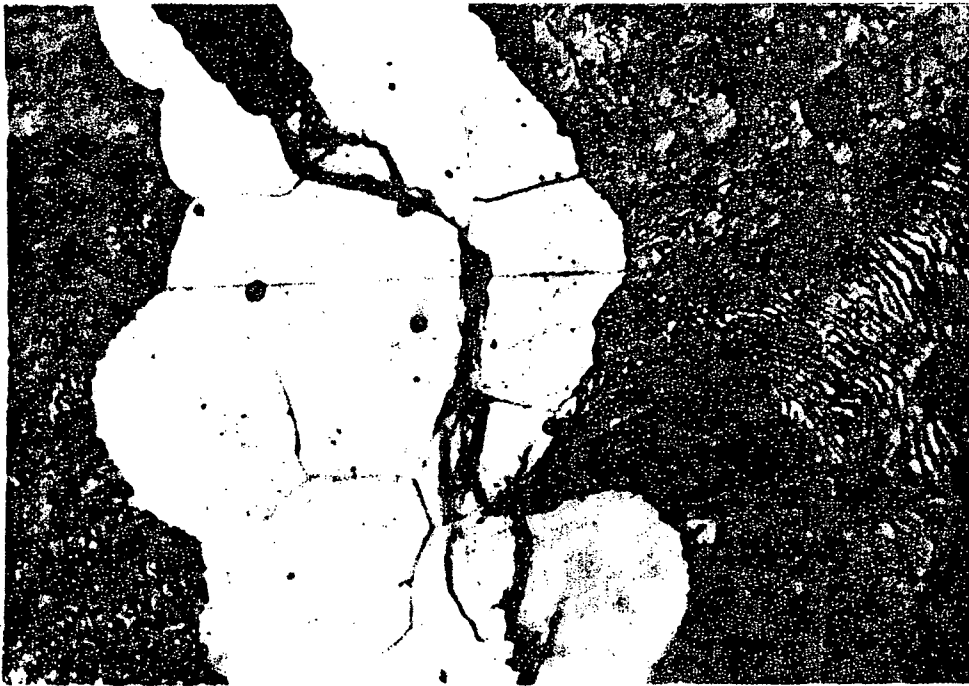
รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลง microstructure เมื่อมีการกระทำ ± 20 MPa, 1000 รอบ (CI1, x 840)



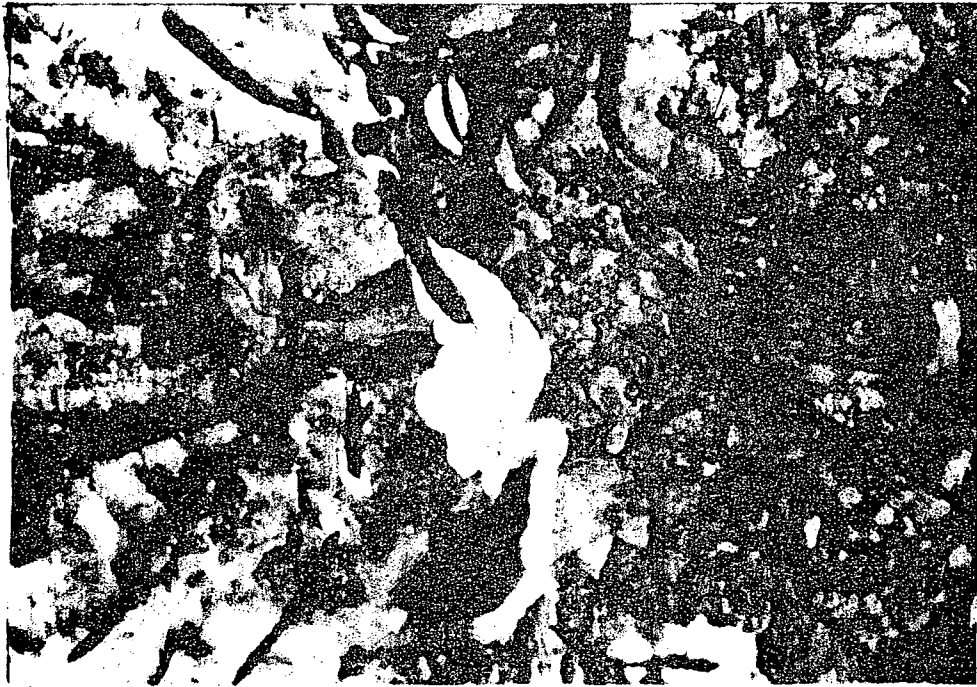
รูปที่ 8 ความเสียหายของกราฟท์และ slip band ใน ferrite
เมื่อมีภาระ ± 40 MPa, 1000 รอบ (CI1, x 840)



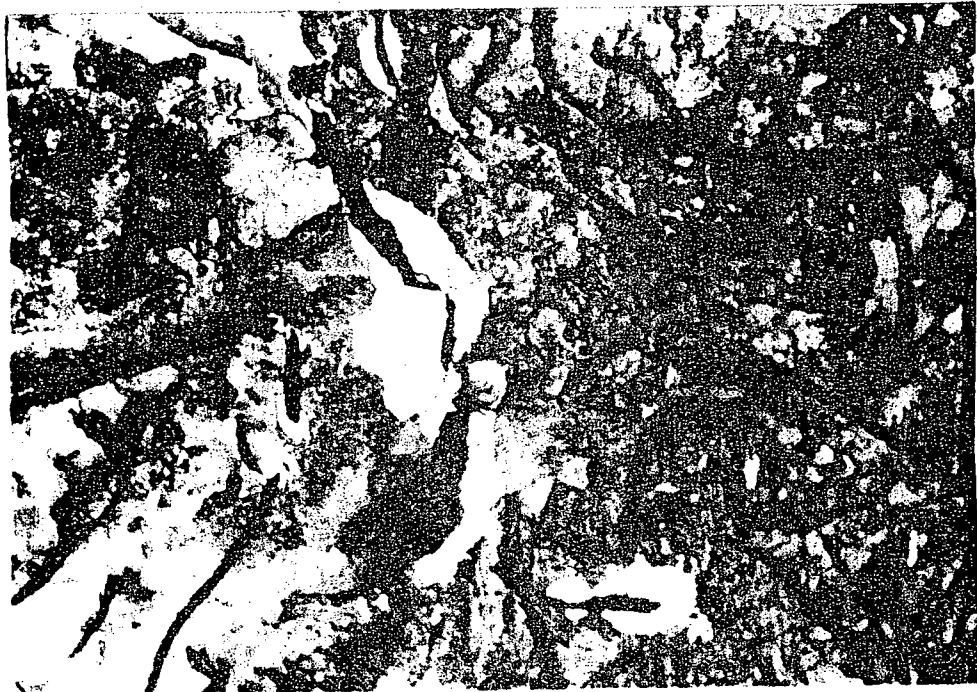
รูปที่ 9 การขยายตัวของ slip band เมื่อมีภาระ ± 40 MPa, 3000 รอบ
(CI1, x 840)



รูปที่ 10 รอยแตกใน ferrite เมื่อมีภาระ ± 60 MPa, 1000 รอบ (CI1, x 840)



(a)



(b)

รูปที่ 11 เปรียบเทียบชิ้นงานบริสุทธิ์ (a) กับชิ้นงาน เมื่อมีการะ ± 60 MPa,
3000 รอบ (b) (CI1, x 210)

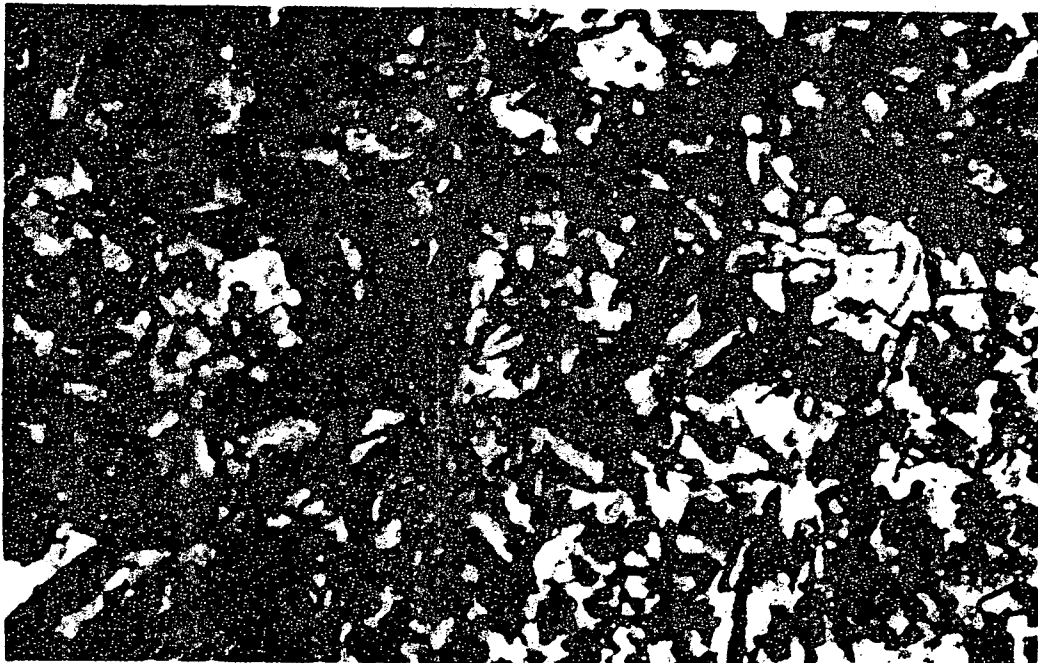


(a)



(b)

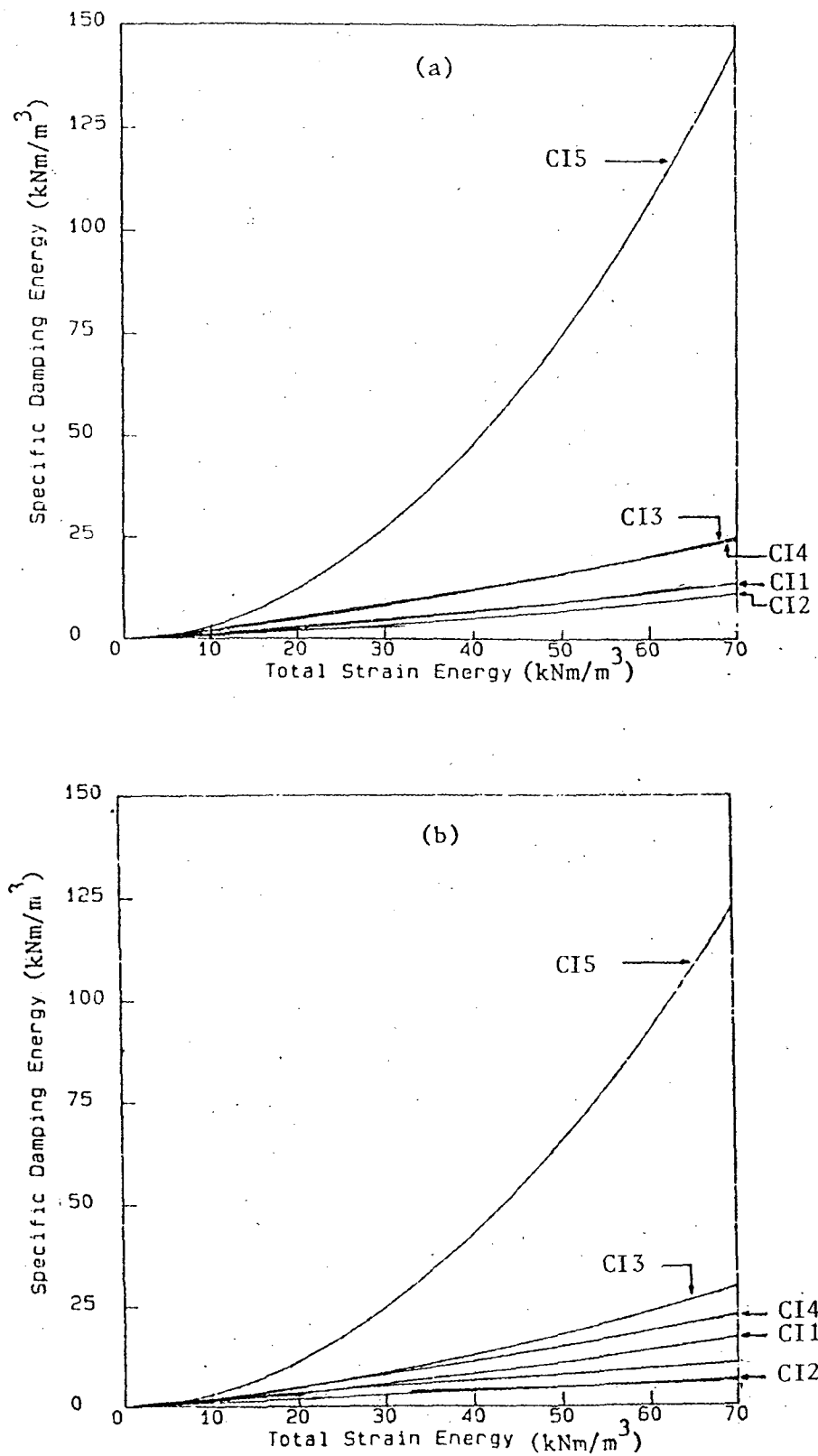
รูปที่ 12 ภาพเปรียบเทียบชิ้นงานบริสุทธิ์ (a) การเกิดและขยายตัวของรอยแตกใน matrix เมื่อมีการะ ± 40 MPa, 3000 รอบ (b) ของ CI3 (x 210)



รูปที่ 13 Microstructure ของ CI4 (x 100)



รูปที่ 14 Microstructure ของ CI5 (x 100)



รูปที่ 15 ความสามารถดูดกลืนพลังงานของเหล็กหล่อทั้ง 5 ชนิด เมื่อรับภาระ 2 ทิศทาง
 (a) Inphase stresses
 (b) Antephas stresses