บทที่ 4

ผลและการวิเคราะห์

4.1 องค์ประกอบ โครงสร้างจุลภาค คุณสมบัติเชิงกล

ในตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กคาร์บอนต่ำที่ผ่านและไม่ผ่านการชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิง ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กคาร์บอนต่ำที่นำเสนอนั้น สอดคล้องกับเหล็ก AISI 1015 [37] ขณะที่ชิ้นทดสอบที่ชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิง พบว่าที่ผิวมีคาร์บอนประมาณ 0.6 wt%

จากผลของ X-ray diffraction ที่แสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของรังสี X-ray (Lin : counts) เปรียบเทียบกับมุมตกกระทบ (2-Theta) หลังจากสะท้อนกลับออกมาผ่านโครงสร้างแบบผลึก ดังแสดงในรูปที่ 4.1 จากกราฟค่า peak แสดงถึงขนาดขององค์ประกอบภายในของเหล็กคาร์บอนต่ำที่การผ่านชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิง ในรูป a แสดงผลการวัดที่ผิว ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างของเหล็กแอลฟา (alpha-Fe) เหล็กไนตราย (iron-nitride) และเหล็กคาร์บอน (carbon-iron) ในขณะรูป b ที่ระยะ 1000 m m ต่ำกว่าผิวจะแสดงเฉพาะโครงสร้างของเหล็กแอลฟาเท่านั้น ดังนั้นจากผลการวัดองค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธี X-ray diffraction พบว่าที่ผิวของเหล็กคาร์บอนต่ำที่ผ่านการชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิงมีองค์ประกอบของเหล็กไนตรายและเหล็กคาร์ไบน์เกิดขึ้นจริง ในขณะที่เนื้อชั้นที่อยู่ต่ำกว่าผิวของชิ้นทดสอบ ซึ่งเป็นชั้นของคาโบไนตรายจะพบเฉพาะโครงสร้างของเหล็กแอลฟาเท่านั้น และเป็นโครงสร้างพื้นฐานของเหล็กคาร์บอนต่ำทั่วไป อย่างไรก็ตามจากข้อมูลที่ได้ จะแสดงเฉพาะขนาดของโครงสร้างภายในของเหล็กที่ใช้ทดสอบเท่านั้น โดยจะไม่แสดงข้อมูลเชิงปริมาณขององค์ประกอบทางเคมี

รูปถ่ายจาก SEM ของเหล็ก AISI 1015 ที่ผ่านและไม่ผ่านการชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิงที่ระยะจากผิวที่แตกต่างกัน แสดงในรูปที่ 4.2a ถึง 4.2e สำหรับเหล็ก AISI 1015 พบว่ามีเหล็กเฟอร์ไรท์ (ferrite) เป็นเฟสหลัก ในขณะที่สามารถสังเกตเห็นเหล็กเพียร์ไรท์ (pearlite) ได้บางส่วน ดังแสดงในรูปที่ 4.2b ในทางตรงกันข้าม เทมเปอร์มาร์เทนไซท์ (tempered martensite) และออสเทนไนท์ตกค้าง (retained austenite) ที่เกิดขึ้นในผิวชั้นนอก (case layer) ของเหล็ก AISI 1015 ที่ผ่านการชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิงดังแสดงในรูปที่ 4.2c และ d โดยจะลดลงตามระยะจากผิวที่

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

เพิ่มขึ้น และแสดงโครงสร้างจุลภาคเช่นเดียวกับเหล็ก AISI 1015 ที่ระยะ 1,000 μm จากผิวนอก ดังแสดงในรูปที่ 4.2e

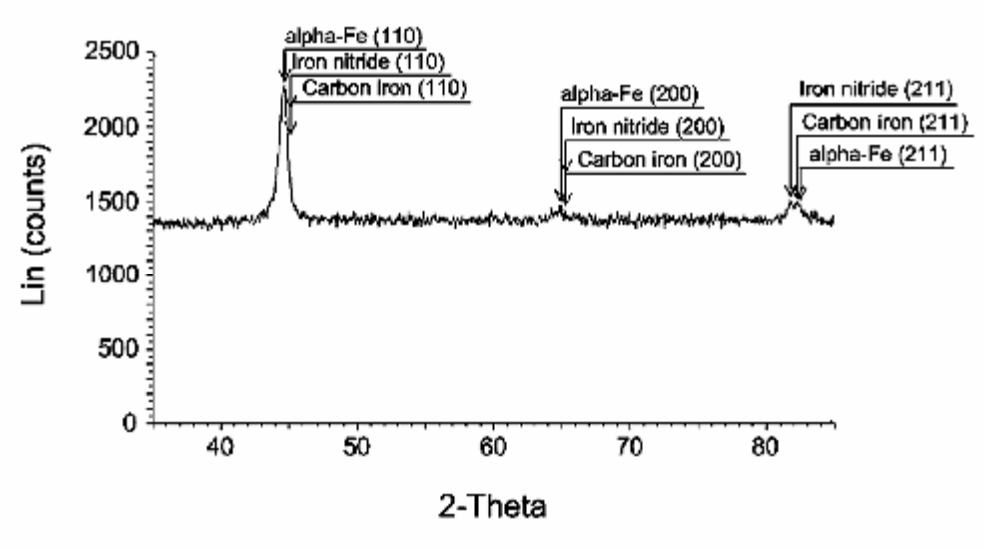
การทดสอบความแข็งจุลภาค ถูกกระทำบนพื้นที่หน้าตัดตามขวางของชิ้นทดสอบในหลายทิศทาง และได้กำหนดเป็นค่าความแข็งเฉลี่ย ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งเฉลี่ยกับระยะจากผิวของชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิง [18] แสดงในรูปที่ 4.3 จากรูปความแข็งจะสูงที่ผิวและลดลงตามระยะจากผิวที่เพิ่มขึ้น และจะคงที่ที่ระยะลึกประมาณ 1,000 μm ขนาดของความแข็งที่บริเวนเนื้อชั้นในจะสอดคล้องกับความแข็งของเหล็ก AISI 1015 ที่ไม่ผ่านการชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิง ซึ่งระยะ effective case depth คือบริเวณที่มีค่าความแข็งเป็น 550 HV เป็น 400 μm คุณสมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดสอบแรงดึงของเหล็ก AISI1015 ที่ผ่านและไม่ผ่านการชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิง สามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 4.2

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

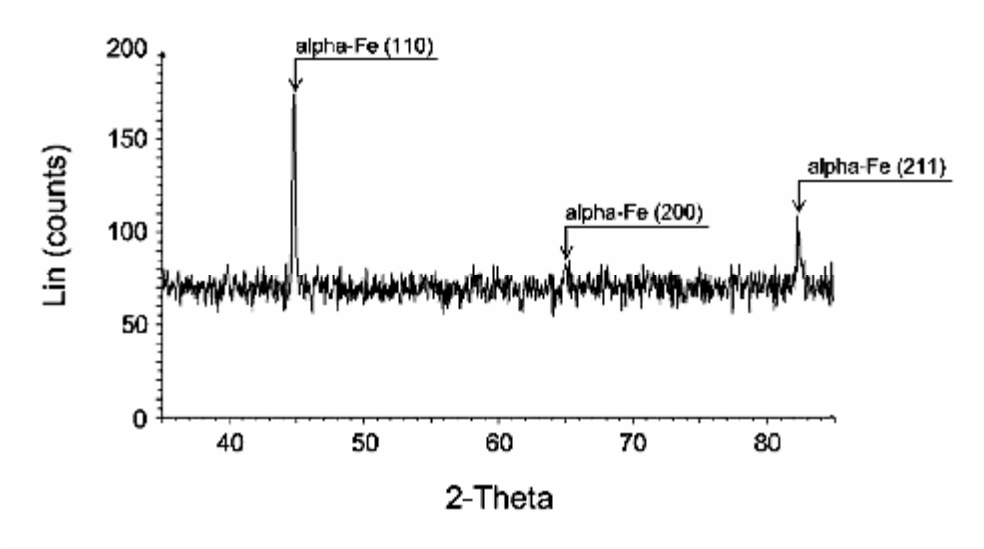
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของเหล็ก AISI 1015 และเหล็ก AISI 1015 ที่ชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิง (wt%)

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Sn	Ti	Cu	Fe
AISI 1015	0.152	0.221	0.392	0.008	0.011	0.030	0.029	0.009	0.001	0.007	0.045	Bal.
Carbonitrided AISI 1015	0.624	0.270	0.336	0.022	0.007	0.071	0.060	0.003	0.011	0.007	0.215	Bal.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com



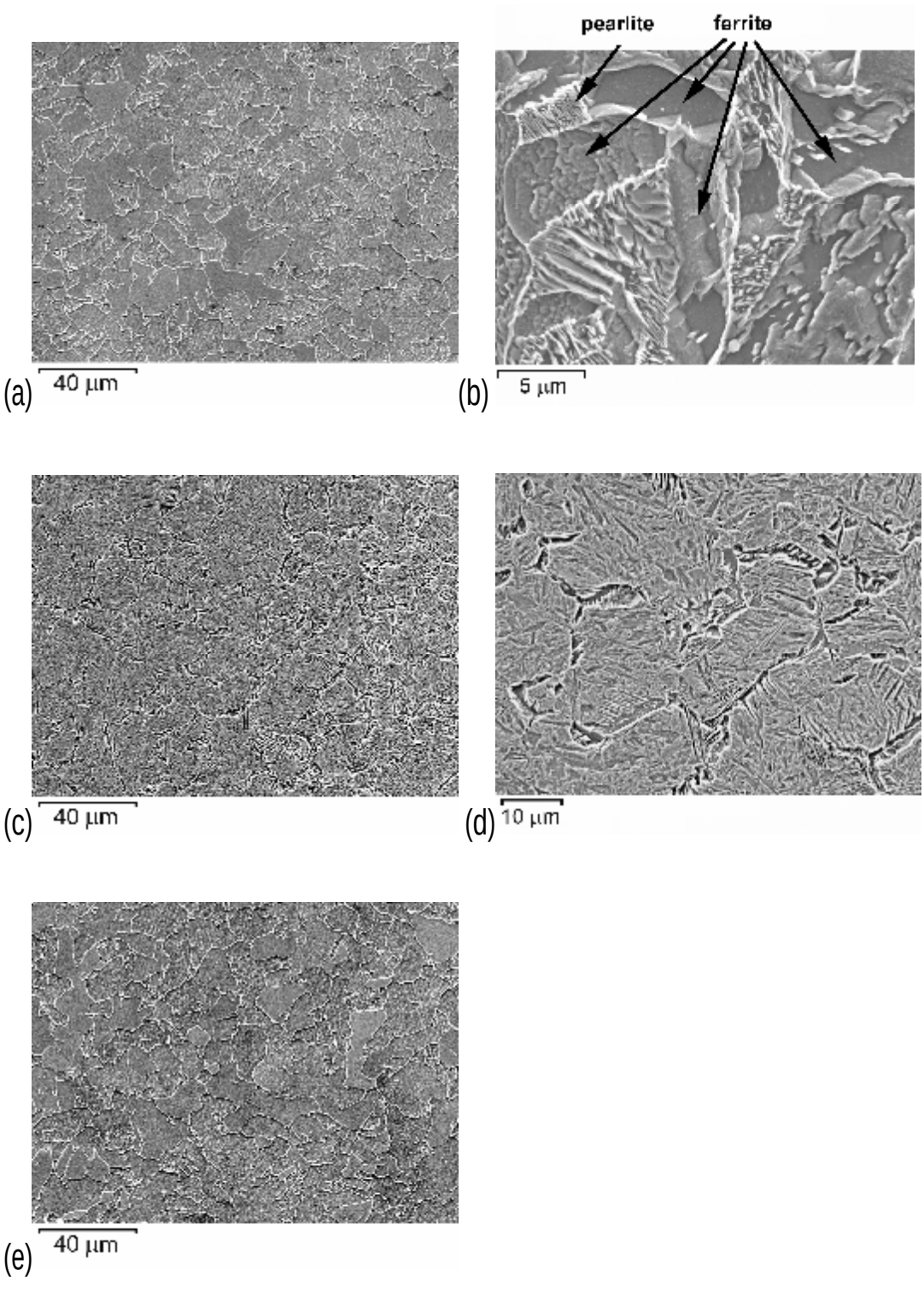
(a)



(b)

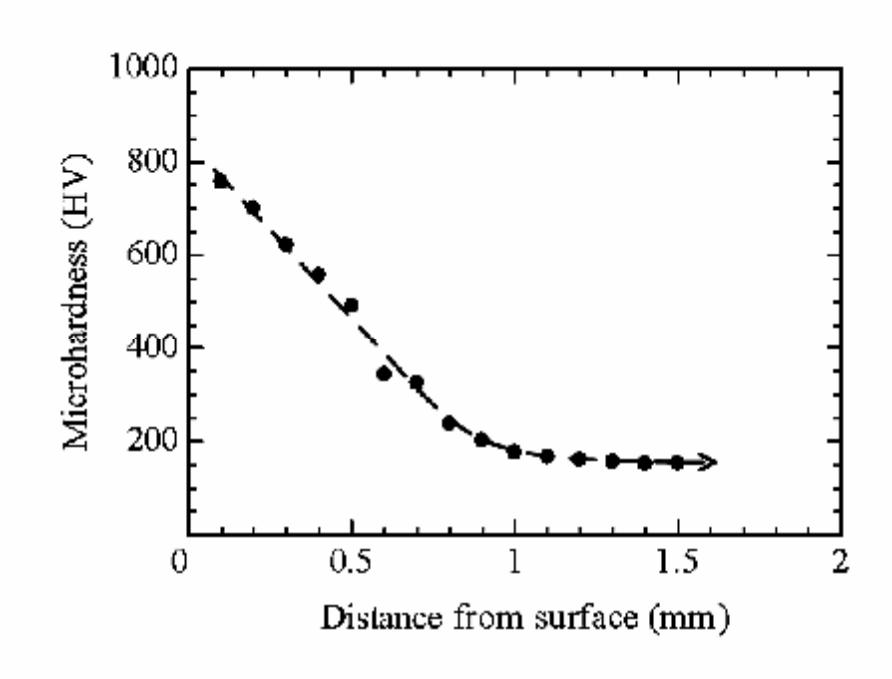
รูปที่ 4.1 รูปแบบของ X-ray diffraction ที่วัดบน
(a) ที่ผิวของชิ้นทดสอบคาโบไนตรายดิง
(b) ที่ระยะ 1,000 *m* m ต่ำกว่าผิวของชิ้นทดสอบคาโบไนตรายดิง

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายของ (a-b) เหล็ก AISI 1015 (c-d) เหล็ก AISI 1015 ที่ชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิงที่ระยะ 100 μm ต่ำกว่าผิว (e) เหล็ก AISI 1015 ที่ชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิงที่ระยะ 1,000 μm ต่ำกว่าผิว

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและระยะห่างจากผิวของเหล็ก AISI 1015 ที่ชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิง

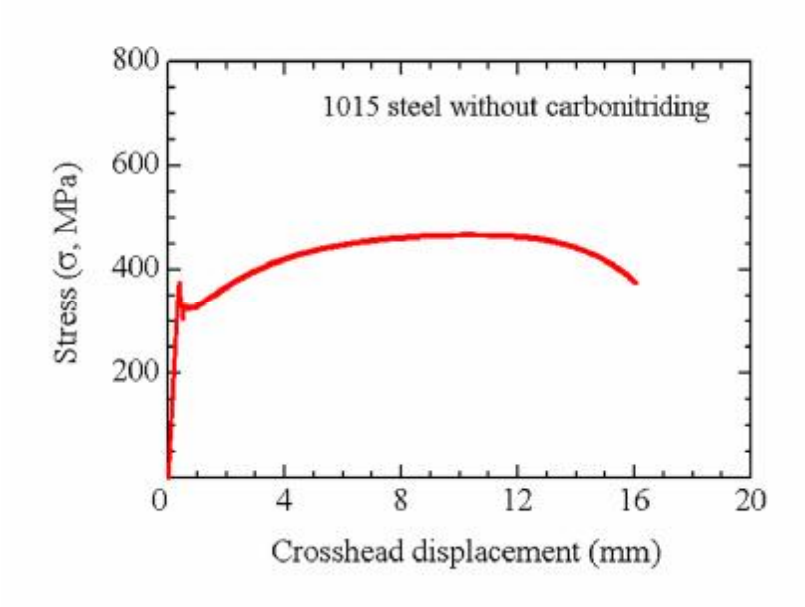
ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติเชิงกลของเหล็ก AISI 1015 ที่ผ่านและไม่ผ่านการชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิง

Mechanical properties	AISI 1015 steel	Carbonitrided AISI 1015 steel
Young's modulus (GPa)	204	230
Yielding strength (MPa)	370	550
Tensile strength (MPa)	460	590
Elongation in 50 mm (%)	27.7	4.5

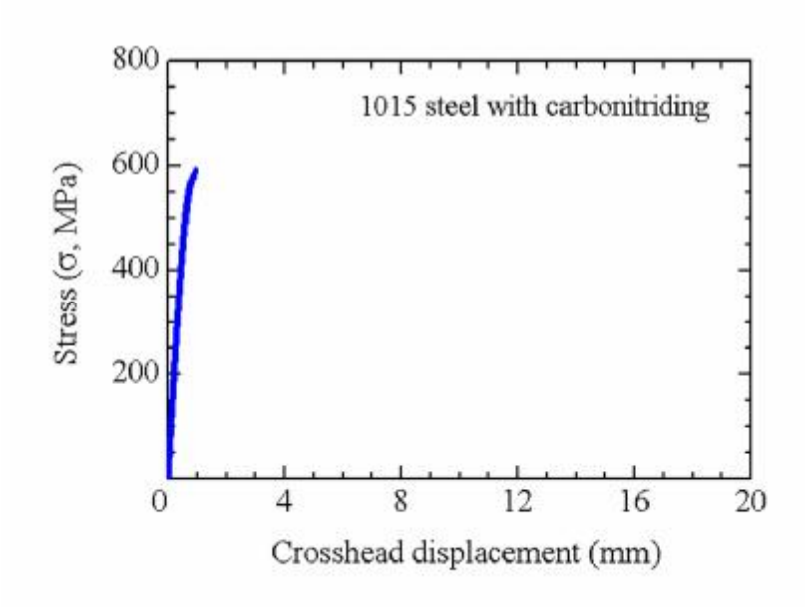
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะยืดตัวของเหล็ก AISI 1015 ที่ไม่ชุบแข็งและชุบแข็งด้วยวิธีคาโบไนตรายดิง จากรูปการเปลี่ยนแปลงขนาดแบบพลาสติก (plastic deformation) ที่แสดงออกมานั้น (เปอร์เซนต์การยืดตัวก่อนการแตกหัก) สามารถสังเกตได้ในเหล็ก AISI 1015 ที่ไม่ผ่านการชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิง ซึ่งเป็นเช่นเดียวกับพฤติกรรมของวัสดุเหนียว ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงขนาดของเหล็ก AISI 1015 ที่ผ่านการชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิง จะถูกควบคุมด้วยชั้นของคาโบไนตราย (carbonitrided layer) จึงทำให้มีการเปลี่ยนแปลงขนาดแบบพลาสติกเกิดขึ้นน้อย ซึ่งเป็นเช่นเดียวกับพฤติกรรมของวัสดุแข็งนั้นเอง ในทางตรงกันข้าม ความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยของค่ายังมอดูลัส (Young's modulus) สามารถสังเกตเห็นได้ระหว่างเหล็ก AISI 1015 ที่ผ่านและไม่ผ่านการชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิง การเปลี่ยนแปลงขนาดแบบอิลาสติก (elastic deformation) จะสัมพันธ์กับการยืดเหนี่ยวของพันธะเคมี ขณะที่การเปลี่ยนแปลงขนาดแบบพลาสติกเกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของอะตอม หรือในทำนองเดียวกับการเคลื่อนที่ของชั้นอะตอม (dislocation) เนื่องจากมีชั้นของคาโบไนตรายเกิดขึ้น การเคลื่อนที่ของชั้นอะตอม จึงมีข้อจำกัดทำให้การเปลี่ยนแปลงขนาดแบบพลาสติกลดลงเช่นเดียวกับที่มีความแข็งแรงของการครากและการดึงเพิ่มขึ้นนั้นเอง

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com



(a)



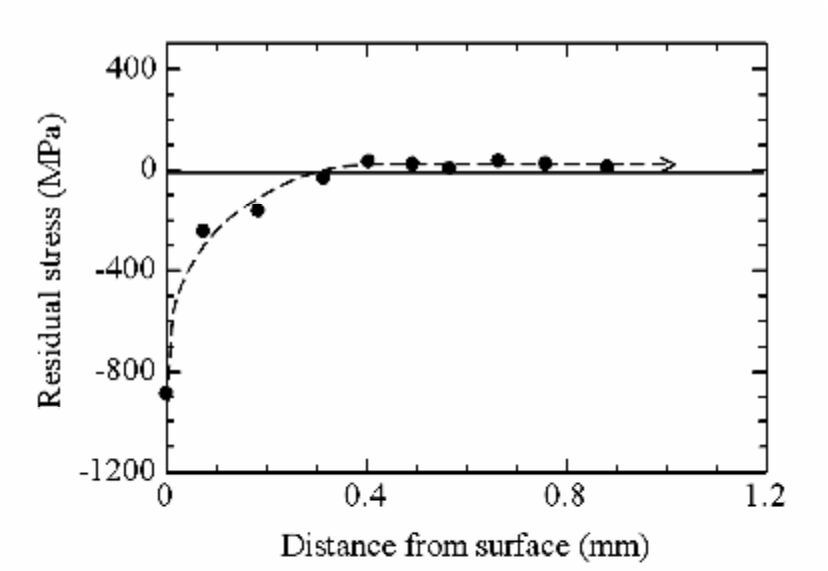
(b)

รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะยืดตัวของชิ้นทดสอบ (a) เหล็ก AISI1015 และ (b) เหล็ก AISI 1015 ที่ผ่านกระบวนการคาโบไนตรายดิง

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

4.2 ความเค้นคงค้าง

กระบวนการทางความร้อน อย่างเช่น การชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิง จะส่งผลให้เกิดความเค้นคงค้างแบบอัดที่ผิวชั้นนอก (case material) และความเค้นคงค้างแบบดึงที่เนื้อชั้นใน (core material) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นคงค้างในทิศทางตามแนวยาวของชิ้นทดสอบการล้าและระยะห่างจากผิวของเหล็ก AISI 1015 ที่ชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิง ซึ่งวัดโดยใช้เทคนิค X-ray diffraction แสดงในรูปที่ 4.5 ความเค้นคงค้างแบบอัดจะสูงที่ผิว และลดลงตามระยะลึกจากผิวที่เพิ่มขึ้น และจะคงที่เมื่อเกิดเป็นความเค้นคงค้างแบบดึง ความเค้นคงค้างแบบอัดที่ผิวมีค่าอยู่ที่ประมาณ 900 MPa ขณะที่ความเค้นคงค้างแบบดึงมีค่าคงที่ประมาณ 20 MPa ช่วงที่เปลี่ยนจากความเค้นคงค้างแบบอัดเป็นความเค้นคงค้างแบบดึงเกิดขึ้นที่ระยะประมาณ 400 m m ซึ่งก็สอดคล้องกับระยะของ effective case depth นั่นเอง

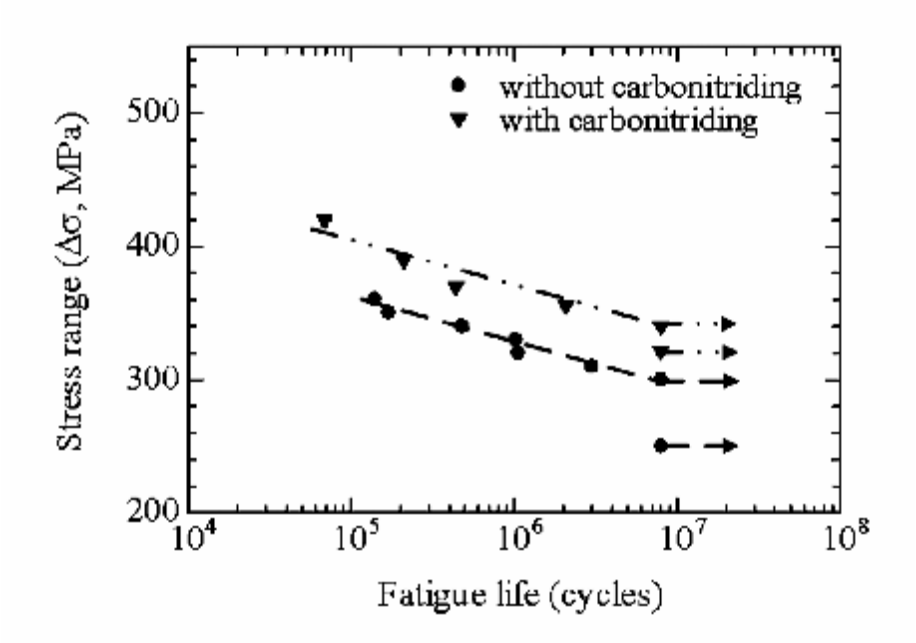


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นคงค้างและระยะห่างจากผิวของเหล็ก AISI 1015 ที่ชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิง

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและอายุการล้า

ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงของความเค้นและจำนวนวงรอบความเสียหายสำหรับเหล็ก AISI 1015 ที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการคาโบไนตรายดิงบนสเกลแบบ linear-log ดังแสดงในรูปที่ 4.6 การเขียนกราฟทั้งสองแสดงอยู่ในลักษณะของเส้นตรง (straight-line) ซึ่งมีเลขยกกำลัง (exponent) เท่ากัน อย่างไรก็ตามเหล็ก AISI 1015 ที่ชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิง จะมีอายุการล้าที่นานกว่าเหล็ก AISI 1015 ที่ไม่ได้ผ่านการชุบแข็ง และขีดจำกัดการล้า (fatigue limit) ของชิ้นทดสอบที่ผ่านและไม่ผ่านการชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิงเท่ากับ 340 MPa และ 300 MPa ตามลำดับ คาร์บอนและไนโตรเจนที่เกิดขึ้นภายในผิวของเหล็ก AISI 1015 ที่ผ่านการชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิง ทำให้รูปแบบของการเกิดสลิปแบนอย่างถาวร (persistent slip bands, PSBs) ที่ผิว เนื่องจากการสะสมและการเคลื่อนที่ของชั้นอะตอมถูกจำกัดไว้ ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้รอยร้าวจากการล้าที่ผิวเกิดขึ้นได้ยาก ยิ่งไปกว่านั้นความเค้นคงค้างแบบอัดที่ผิวชั้นนอกของเหล็ก AISI 1015 ที่ผ่านการชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิง ยังสามารถชะลอการขยายตัวของรอยร้าวที่เกิดขึ้นได้ เพราะฉะนั้น จึงทำให้อายุการล้าและขีดจำกัดการล้าของเหล็กคาโบไนตรายสูงขึ้นนั้นเอง

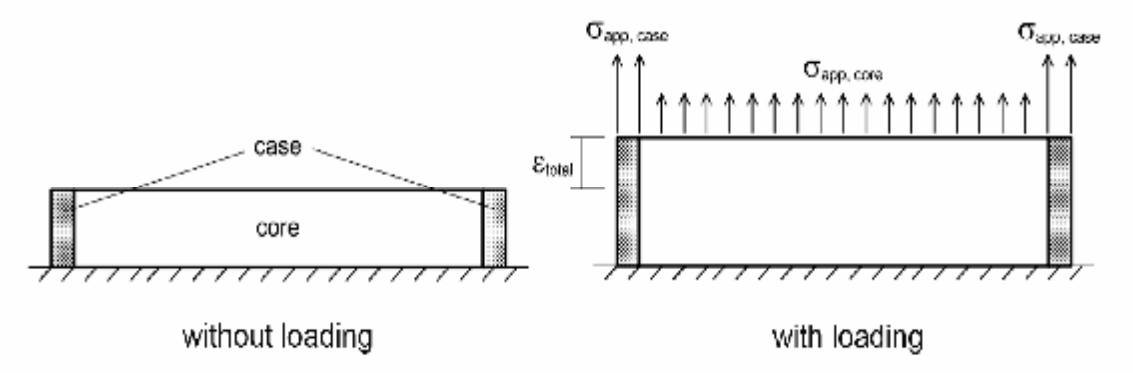


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงของความเค้นและอายุการล้า

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

4.4 ผลกระทบของความเค้นคงค้างต่อความต้านทานการล้า

ถ้าปราศจากความไม่ต่อเนื่องที่บริเวณรอยต่อระหว่างผิวชั้นนอกและเนื้อชั้นใน (case-core interface) ความเครียดทั้งหมด (e_{total}) ความเครียดที่เกิดขึ้นที่ผิวชั้นนอก (e_{case}) และความเครียดที่เกิดขึ้นที่เนื้อภายใน (e_{core}) ของเหล็กในระหว่างการรับภาระแบบวงรอบมีค่าเท่ากัน ขณะที่ความเค้นที่ใช้ในผิวชั้นนอก ($s_{app,case}$) และความเค้นที่ใช้ในเนื้อชั้นใน ($s_{app,core}$) มีความแตกต่างกัน เนื่องจากคุณสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.7 ภาพเขียนของเหล็ก AISI 1015 ที่ชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิงที่ไม่มีและมีภาระกระทำ

ในรูปที่ 4.7 แสดงรูปภาพของชิ้นทดสอบที่มีและไม่มีภาระมากระทำ ซึ่งผลของความเครียดทั้งหมด (e_{total}) และความเครียดที่เกิดขึ้นในเนื้อเหล็ก (e_{core}) สามารถพิจารณาได้ดังนี้

$$e_{total} = \frac{s_{app,speciment}}{E_{specimen}} \qquad (4.1)$$

$$e_{core} = \frac{s_{app,core}}{E_{core}} \qquad (4.2)$$

เมื่อ $s_{app,specimen}$ คือความเค้นที่ใช้บนชิ้นทดสอบ $s_{app,core}$ คือความเค้นที่ใช้ในเนื้อชั้นในวัสดุ $E_{specimen}$ คือค่ายังมอดูลัสของชิ้นทดสอบของเหล็ก AISI 1015 ที่ผ่านการชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิงและ E_{core} คือค่ายังมอดูลัสที่เนื้อชั้นในของวัสดุของเหล็ก AISI 1015 บนพื้นฐานการ

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

สมดุลของความเครียดที่เกิดขึ้นระหว่างเนื้อชั้นในและความเครียดของชิ้นทดสอบ $\left(e_{tatal} = e_{core}\right)$ ค่าความเค้นที่ใช้บนเนื้อชั้นในของวัสดุ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$s_{app,core} = s_{app,specimen} \frac{E_{core}}{E_{specimen}} \tag{4.3}$$

เนื่องจากภาระที่ใส่บนชิ้นทดสอบมีค่าเท่ากับผลรวมระหว่างภาระที่ใส่ในผิวชั้นนอกและภาระที่ใส่ในเนื้อชั้นใน ทำให้ความเค้นที่ใช้บนผิวชั้นนอก สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$s_{app,specimen} \cdot A_{specimen} = s_{app,case} \cdot A_{case} + s_{app,core} \cdot A_{core} \tag{4.4}$$

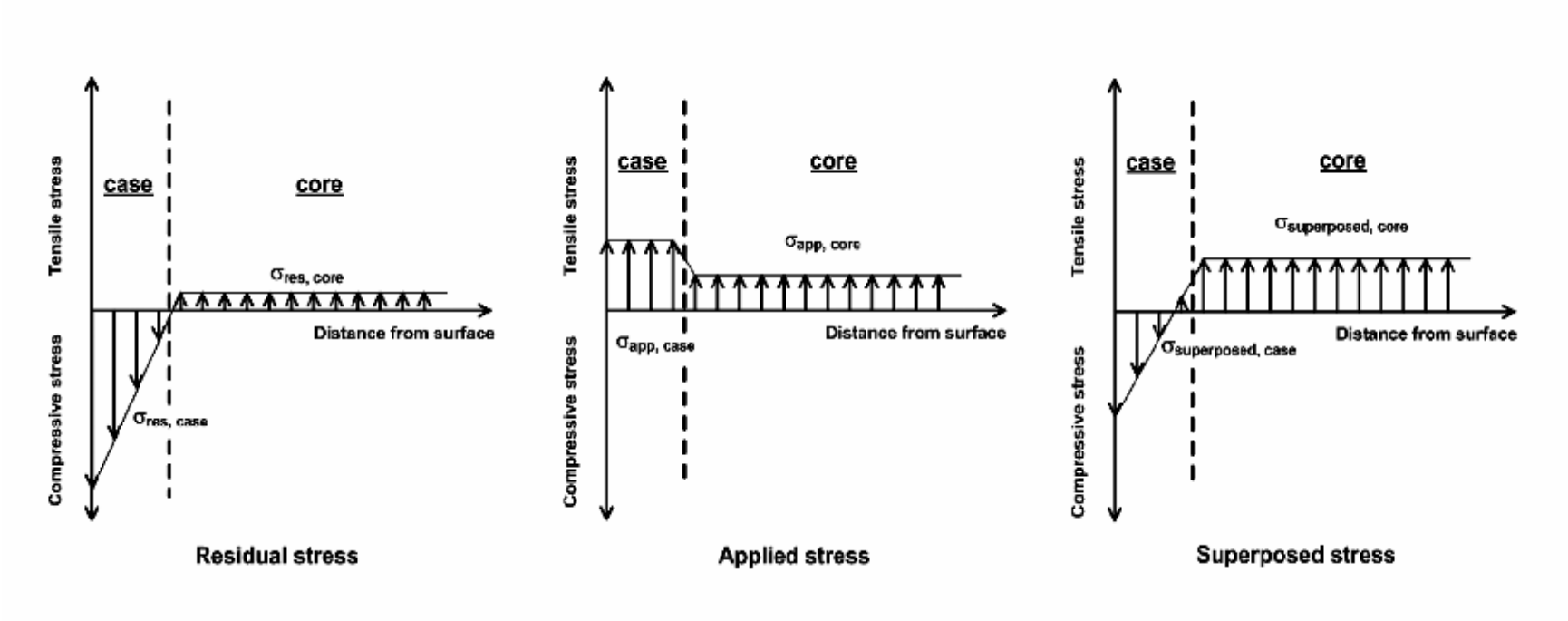
$$s_{app,case} = \frac{s_{app,specimen} \cdot A_{specimen} - s_{app,core} \cdot A_{core}}{A_{case}} \tag{4.5}$$

เมื่อ $A_{specimen}$ คือพื้นที่หน้าตัดบนชิ้นทดสอบคาโบไนตรายดิง A_{case} คือพื้นที่ของผิวชั้นนอกและ A_{core} คือพื้นที่ของเนื้อชั้นในของวัสดุ

ความเค้นดึงที่กระทำบนผิวชั้นนอกของชิ้นทดสอบจะถูกหักล้างด้วยความเค้นคงค้างแบบอัด ในขณะที่ความเค้นดึงที่กระทำบนผิวชั้นในของชิ้นทดสอบจะถูกเสริมด้วยความเค้นคงค้างแบบดึง [25,26] ภาพเขียนแสดงการรวมกันระหว่างความเค้นคงค้างกับความเค้นที่กระทำ ซึ่งเป็นผลรวมของความเค้น $\left(s_{\sup erposed}\right)$ ถูกแสดงในรูปที่ 4.8 เมื่อความเค้นรวมที่เกิดขึ้นบนผิวชั้นนอกคือความเค้นอัด ในขณะที่เนื้อชั้นในของวัสดุเป็นความเค้นดึง จากผลดังกล่าวพบว่า ผลรวมของความเค้นดึงสูงสุดไม่ได้เกิดขึ้นบนผิวของชิ้นทดสอบ แต่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างผิวชั้นนอกกับเนื้อชั้นในของชิ้นทดสอบ สำหรับตารางที่ 4.4 แสดงผลของความเค้นที่กระทำบนชิ้นทดสอบและผลรวมของความเค้นดึงสูงสุดระหว่างรอยต่อของผิวชั้นนอกและเนื้อชั้นในของชิ้นทดสอบ พบว่าผลรวมของความเค้นดึงสูงสุดที่บริเวณรอยต่อของผิวชั้นนอกและเนื้อชั้นในต่ำกว่าความเค้นที่กระทำบนชิ้นทดสอบ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ความต้านทานการล้าของเหล็ก AISI 1015 ที่ผ่านการชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิงสูงกว่าเหล็ก AISI 1015 ที่ไม่ผ่านการชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิง ดังที่แสดงก่อนหน้านี้ในรูปที่ 4.6

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com



รูปที่ 4.8 ภาพเขียนแสดงผลรวมความเค้น (superposed stress) ระหว่างความเค้นคงค้างและความเค้นที่ใช้ทดสอบของเหล็ก AISI 1015 ที่ชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิง

ตารางที่ 4.3 ความเค้นที่ใช้ทดสอบ ความเค้นคงค้างและความเค้นรวมของชิ้นทดสอบ AISI 1015 ที่ชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิงระหว่างการทดสอบการล้า

Applied stress on specimen	Applied stress on core material	Tensile residual stress in core	Maximum tensile superposed stresses at case-core
340	301.6	20	321.6
360	319.3	20	339.3
370	328.2	20	348.2
390	345.9	20	365.9
420	372.5	20	392.5

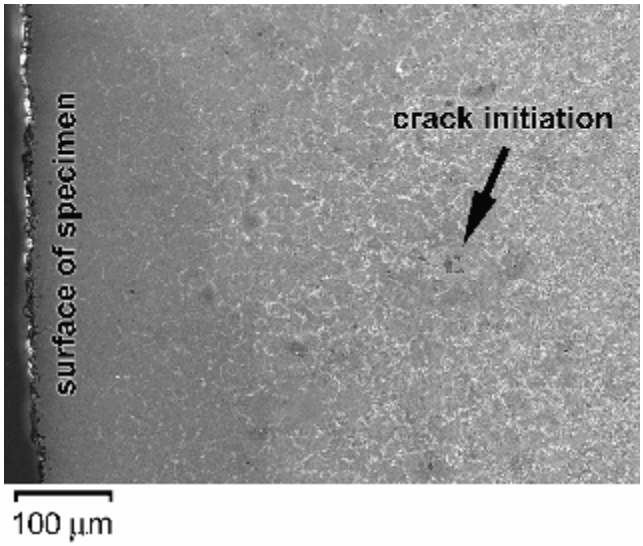
4.5 กลไกการล้า

ในการศึกษากลไกการเกิดของรอยร้าวจากการล้า ของชิ้นทดสอบการล้า AISI 1015 ที่ผ่านการชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิง ซึ่งรับภาระแบบวงรอบที่ช่วงความเค้น 420 MPa จนถึงประมาณ 80% ของอายุการล้าทั้งหมด ได้ถูกตัดออกตามแนวยาวสังเกตด้วย SEM ซึ่งพื้นที่หน้าตัดตามแนวยาวของชิ้นทดสอบ แสดงในรูปที่ 4.9 จากผลดังกล่าวพบว่า ที่ใต้ผิวประมาณ 400 m m ปรากฏรอยร้าวตามขอบเกรน (intergranular) ซึ่งสอดคล้องกับบริเวณที่ผลรวมของความเค้นดึงมีค่าสูงสุด ได้เกิดขึ้นที่รอยต่อระหว่างผิวชั้นนอกและเนื้อชั้นในของวัสดุ การแตกหักตามขอบเกรนที่อุณหภูมิทดสอบปกติอาจจะเกิดขึ้นเนื่องจากสาเหตุหลายประการ อย่างเช่น เกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรน การตกตะกอนของเฟสที่มีความเปราะตามขอบเกรน เกิดสภาพเปราะจากไฮโดรเจน [34] เนื่องจากเหล็กคาโบไนตรายดิงที่ทดสอบใช้วิธีชุบแข็งโดยตรง ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าอาจจะเกิดการแตกตัวของฟอสฟอรัสตามขอบเกรนหรือเกิดอนุภาคซีเมนไทต์ (cementite) ตามขอบเกรน [27,28] ทำให้ขอบเกรนมีความเปราะและไวต่อการแตกหัก ถึงแม้ว่าความเค้นคงค้างภายในผิวชั้นนอกสามารถยับยั้งการขยายตัวของรอยร้าวได้ แต่ในที่สุดเมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้นรอยร้าวก็ยังสามารถขยายตัวได้ ดังที่รายงานไปแล้วก่อนหน้านี้โดย Farfan และคณะ [22] สำหรับชิ้นทดสอบ AISI 8620 ที่ผ่านการชุบแข็งแบบคาบูไรซิงภายใต้การล้าแบบวงรอบสูงใน

ผิวการแตกหักของเหล็ก AISI 1015 ที่ผ่านการชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิง หลังจากรับภาระแบบวงรอบในช่วงความเค้นประมาณ 420 MPa ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ภายในผิวชั้นนอก

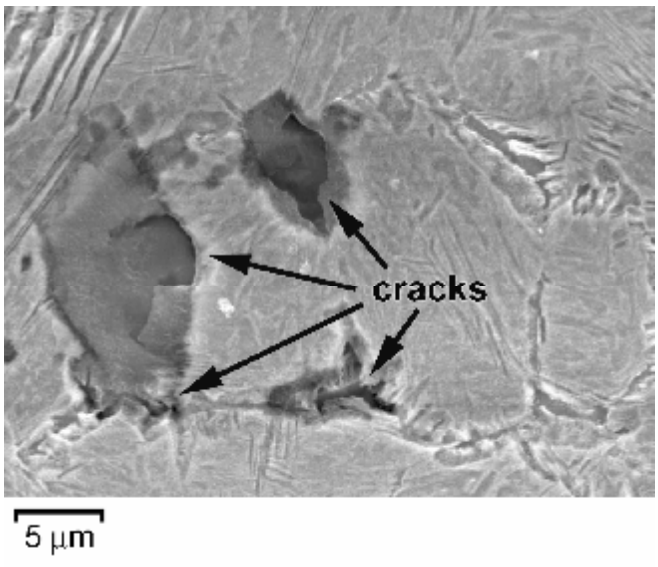
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

ของวัสดุมีรอยร้าวเล็ก ๆ ขยายตัวภายใต้ภาระแบบวงรอบรอบขอบเกรน ซึ่งส่งผลให้เกิดการแตกหักตามขอบเกรนขึ้น (ในรูปที่ 4.10b) ในขณะที่แบบภาระสถิตเกิดขึ้นภายในเนื้อชั้นในของชิ้นทดสอบ โดยเกิดร่วมกับช่องว่าง (dimples) ทำให้แสดงลักษณะช่องว่างขยายตัว (elongated dimples) ดังแสดงในรูปที่ 4.10c เมื่อพื้นที่การเกิดรอยร้าวเพิ่มขึ้นพื้นที่การรับภาระลดลง ทำให้เกิดการขยายตัวของรอยร้าวอย่างรุนแรง และในที่สุดก็เกิดการแตกหักขึ้น (รูปที่ 4.10d) ผิวการแตกหักจะประกอบด้วยหลุมวงกลมแบบสมมาตร (equiaxed dimples) หลายขนาด ซึ่งถูกแทนด้วยการแตกหักแบบเหนียว



(a)

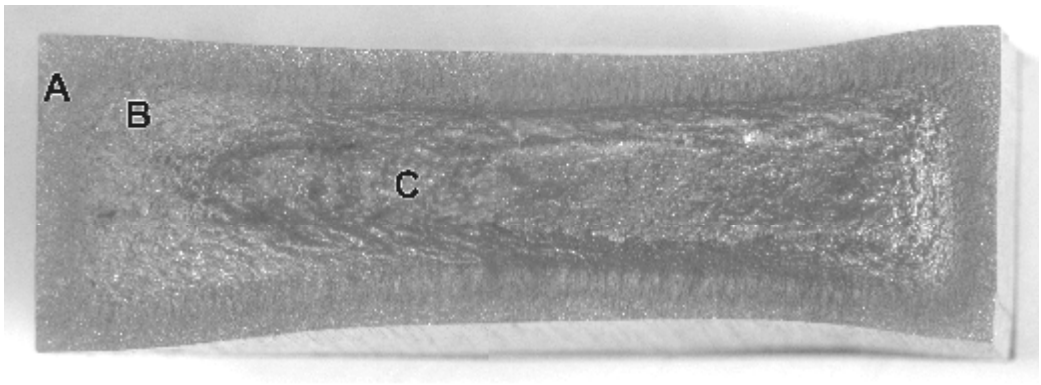
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com



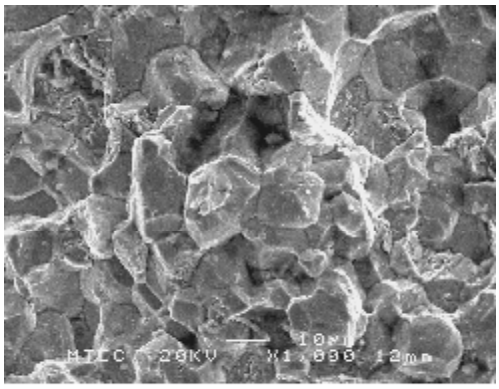
(b)

รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายของรอยร้าวเล็ก ๆ เกิดขึ้นที่ระยะต่ำกว่าผิวประมาณ 400 μm สำหรับชิ้นทดสอบการล้าที่ความเค้น 420 MPa จนถึง 80% ของอายุการล้า
(a) กำลังขยายต่ำ (b) กำลังขยายสูง (เมื่อภาระอยู่ในแนวแกนตั้ง)

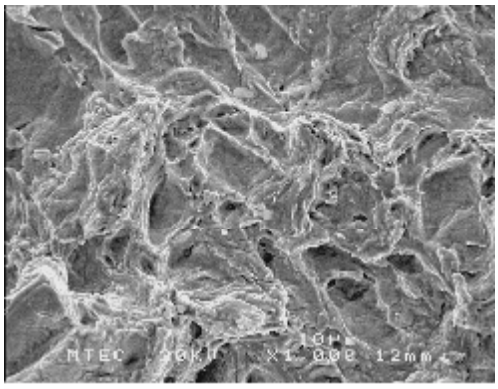
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com



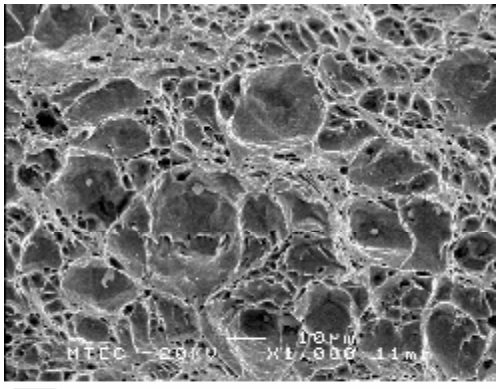
(a) 1 mm



(b) 10 µm Area A



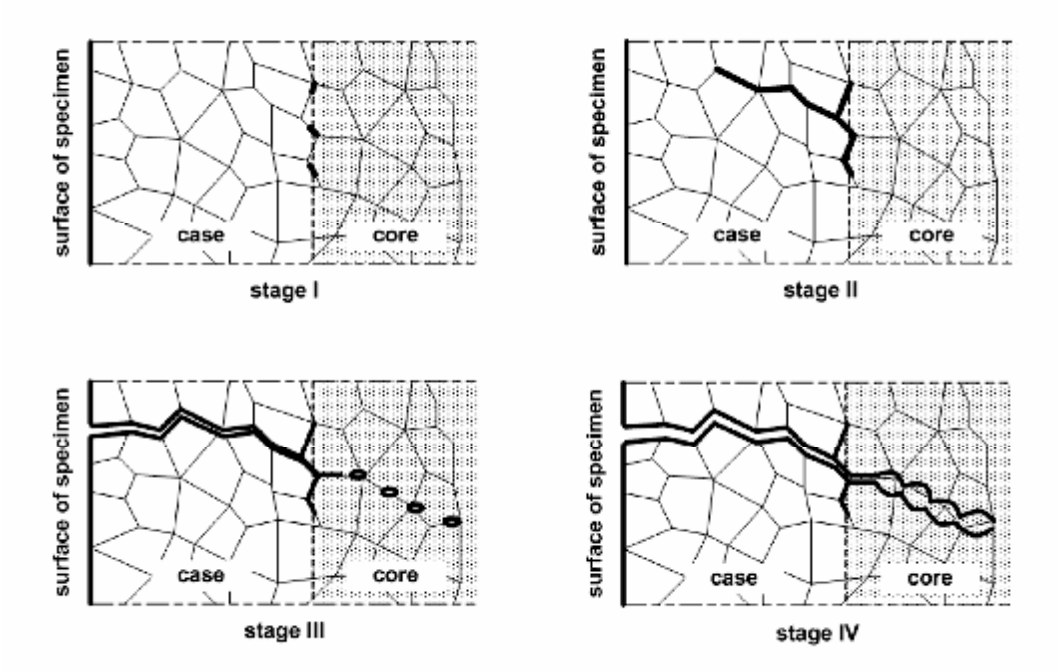
(c) 10 µm Area B



(d) 10 µm Area C

รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายผิวการแตกหักของเหล็ก AISI 1015 ที่ชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิงหลังจากทดสอบการล้าที่ช่วงความเค้นเท่ากับ 420 MPa (a) ผิวการแตกหักทั้งหมด (b) การล้าที่ผิวชั้นนอก (c) การแตกหักคงที่เนื้อชั้นในและ (d) การแตกหักสุดท้ายที่เนื้อชั้นใน

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

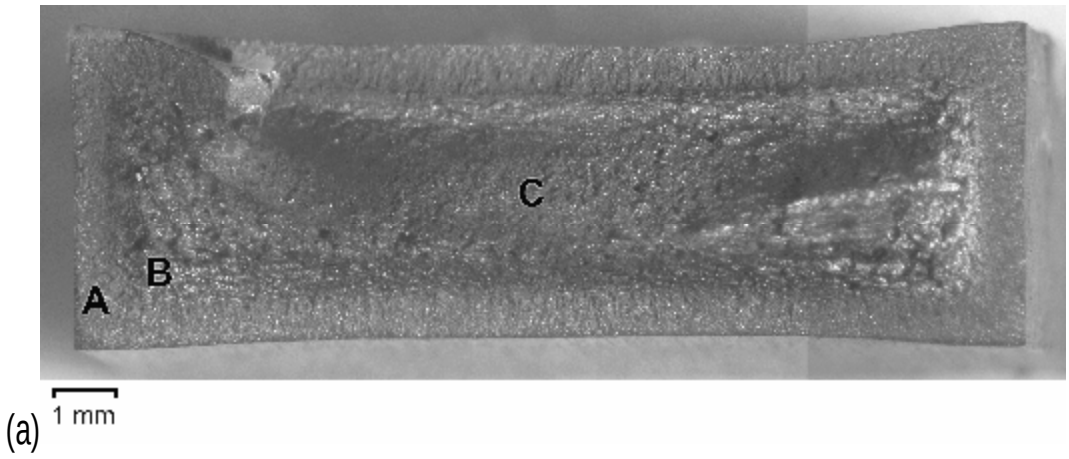


รูปที่ 4.11 ภาพเขียนแสดงกระบวนการล้าของเหล็ก AISI 1015 ที่ชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิง (เมื่อภาระอยู่ในแนวแกนตั้ง)

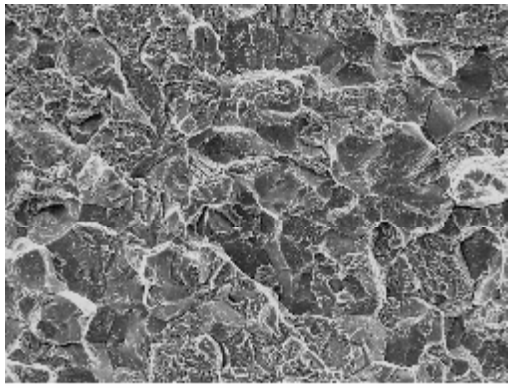
รูปแบบของกลไกการล้าสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.11 โดยขั้นที่ 1 แสดงการเกิดของรอยร้าวที่รอยต่อระหว่างผิวชั้นนอกและเนื้อชั้นใน โดยบางส่วนที่รอยร้าวรวมเกิดการตัวกันและกลายเป็นรอยร้าวที่ยาวขึ้น ขณะที่จำนวนวงรอบเพิ่มขึ้น รอยร้าวเล็ก ๆ ก็ขยายตัวผ่านผิวชั้นนอก (ขั้นที่ 2) ซึ่งมีความเปราะและแตกหักได้ง่ายกว่าที่เนื้อชั้นใน เมื่อจำนวนรอบของภาระเพิ่มขึ้นรอยร้าวเล็ก ๆ สามารถขยายได้ถึงผิวของชิ้นทดสอบ และกลายเป็นรอยร้าวหลักได้ (ขั้นที่ 3) ในระหว่างขั้นตอนนี้ จะมีความเค้นเกิดขึ้นสูงรอบ ๆ ปลายรอยร้าว (crack tip) ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดรูปแบบของช่องว่าง (void) ในเนื้อชั้นในของวัสดุ ในขั้นตอนสุดท้าย (ขั้นที่ 4) รอยร้าวจะเชื่อมโยงกับช่องว่างและขยายตัวเข้าในเนื้อชั้นในของชิ้นทดสอบ จึงทำให้เกิดความเสียหายอย่างสมบูรณ์

ผิวการแตกหักของเหล็ก AISI 1015 ที่ผ่านการชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิงหลังจากการทดสอบการดึงถูกแสดงในรูปที่ 4.12 ซึ่งต่างจากผิวการแตกหักของชิ้นทดสอบการล้า โดยรอยร้าวเกิดขึ้นที่ผิวนอกและขยายตัวผ่านผิวชั้นนอก (รูปที่ 4.12b) ในลักษณะผสมระหว่างความเสียหายตามขอบเกรน (intergranular) และความเสียหายตัดผ่านเกรน (transgranular) อย่างไรก็ตาม ผิวการแตกหักของชิ้นทดสอบการดึงก็ยังแสดงลักษณะคล้ายกับชิ้นทดสอบการล้าในส่วนของการขยายตัวของรอยร้าวผ่านเนื้อชั้นในของวัสดุ (รูปที่ 4.12c และ 4.12d)

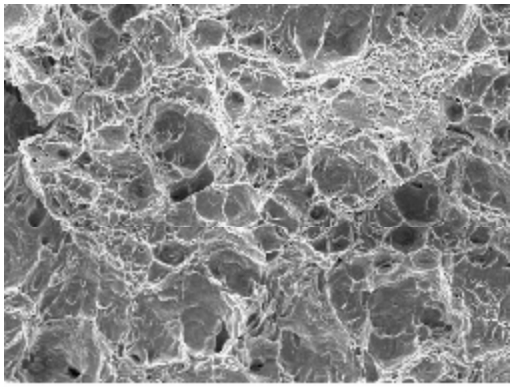
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com



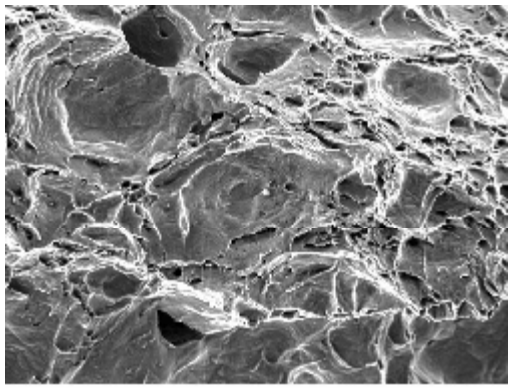
(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายผิวการแตกหักของเหล็ก AISI 1015 ที่ชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิงหลังจากทดสอบการดึง (a) ผิวการแตกหักทั้งหมด (b) การแตกหักที่ผิวชั้นนอก (c) การแตกหักที่เนื้อชั้นใน และ (d) การแตกหักสุดท้ายที่เนื้อชั้นใน

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาผลกระทบของความเค้นคงค้างต่อพฤติกรรมและกลไกการล้าของเหล็ก AISI 1015 ที่ผ่านการชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิงภายการรับภาระแบบวงรอบในแนวแกน มีข้อสรุปหลัก ๆ ดังต่อไปนี้

(1) การใช้เทคนิคอิเล็คโทรโพลิชชิง โดยนำชั้นบาง ๆ ของชิ้นทดสอบออกที่ละชั้นและใช้เทคนิค X-ray diffraction วัดความเค้นคงค้างและองค์ประกอบของวัสดุ สามารถวัดค่าความเค้นคงค้างแบบอัดที่ผิวได้ประมาณ 900 MPa ซึ่งจะลดลงตามความลึกจากผิวนอก และกลายเป็นความเค้นคงค้างแบบดึงที่มีค่าคงที่ ประมาณ 20 MPa ซึ่งสอดคล้องกับการเกิดขององค์ประกอบเหล็กคาร์บอนและเหล็กไนโตรเจนจำนวนมากที่ผิวชั้นนอก โดยลดลงตามความลึกจากผิวนอกและแสดงองค์ประกอบหลักเป็นเหล็กที่เนื้อชั้นใน

(2) ความเค้นคงค้างแบบอัดที่เกิดขึ้นและการเกิดของโลหะผสมระหว่างเหล็กคาร์บอนและเหล็กไนโตรเจนที่ผิวชั้นนอกของเหล็ก AISI 1015 ที่ผ่านการชุบแข็งด้วยวิธีคาโบไนตรายดิง ทำให้ความต้านทานการล้าของเหล็ก AISI 1015 ที่ผ่านการชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิงสูงกว่าเหล็ก AISI 1015 ที่ไม่ผ่านการชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิง โดยขีดจำกัดการล้าของเหล็ก AISI 1015 ที่ผ่านและไม่ผ่านการชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิงคือ 340 MPa และ 300 MPa ตามลำดับ

(3) รอยร้าวขนาดเล็กที่เกิดขึ้นบริเวณจุดเปลี่ยนระหว่างความเค้นคงค้างแบบอัดที่ผิวชั้นนอกเป็นความเค้นคงค้างแบบดึงที่เนื้อชั้นในของเหล็ก AISI 1015 ที่ผ่านการชุบแข็งด้วยวิธีคาโบไนตรายดิงจากผิวนอกประมาณ 400 m m ขณะที่จำนวนรอบเพิ่มขึ้น ทำให้รอยร้าวรวมตัวกันและขยายตัวตามขอบเกรนผ่านผิวชั้นนอก และกลายเป็นรอยร้าวหลักในที่สุด ในขั้นตอนนี้ความเค้นจะสูงขึ้น และเป็นสาเหตุให้เกิดช่องว่างในเนื้อชั้นในของเหล็ก เมื่อการขยายตัวของรอยร้าวผ่านเนื้อชั้นในและรวมตัวกับช่องว่างภายใน จะทำให้เกิดความเสียหายอย่างสมบูรณ์ขึ้น

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com