

รายการอ้างอิง

- [1] S.L. Semiatin: Metalworking: Sheet Forming / ASM Handbook Volume 14B, หน้า 319-321. United States of America. ASM International Materials Park. 2006
- [2] Rudolf Steiner: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys / ASM Handbook Volume 1, หน้า 573-579. United States of America. ASM International Materials Park. 2006
- [3] D.A. Karlyn, R.W. Vieth and J.L. Forand: Trans. ASM, (1968), 61, หน้า 653.
- [4] F. Brian Pickering: Constitution and Properties of Steels / Materials Science and Technology Volume 7. Weinheim New York Basel Cambridge. VCH Publishers Inc. 1992
- [5] D.T. Llewellyn and R.C. Hudd. Metallurgy & Applications. Third edition. Butterworth-Heinemann. 1998
- [6] H. Zhao, S.C. Rama, G.C. Barber, Z. Wang and X. Wang, Experimental study of drawability of hot rolled IF steel, Journal of Materials Processing Technology, 128, (2002): 73-79
- [7] Wanqiang Xu, Effect of Initial Microstructure on the Deformation and Annealing Behavior of Low Carbon Steel, DOCTOR OF PHILOSOPHY THESIS, University of New South Wales School of Materials Science and Engineering, 2006

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเหล็กกล้าคาร์บอนทรงแบนรีดร้อนสำหรับงานทั่วไป และงานขึ้นรูป (มอก. 528-2548)

ขอบข่าย

1. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ ไม่ครอบคลุมถึงเหล็กกล้าคาร์บอนทรงแบนรีดร้อนสำหรับใช้ในงานที่มีจุดประสงค์อื่น ๆ ที่ได้กำหนดเป็นมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนทรงแบนรีดร้อนสำหรับงานโครงสร้าง
- 2 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ ไม่ครอบคลุมถึงเหล็กกล้าคาร์บอนทรงแบนรีดร้อนที่นำไปรีดเย็นต่อ
- 3 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ ไม่ครอบคลุมถึงเหล็กกล้าคาร์บอนทรงแบนรีดร้อนที่ผิวมีลวดลาย (floor plates or checkered plate)

บทนิยาม

ความหมายของคำที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ มีดังต่อไปนี้

- 1 เหล็กกล้าคาร์บอนทรงแบนรีดร้อน ซึ่งต่อไปในมาตรฐานนี้จะเรียกว่า เหล็กแผ่น หมายถึง แผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนซึ่งมีส่วนประกอบทางเคมีดังตารางที่ ก.1 ที่รีดเป็นแผ่นขณะร้อน
- 2 เหล็กแผ่นชนิดแผ่นม้วน ซึ่งต่อไปในมาตรฐานนี้จะเรียกว่า เหล็กแผ่นม้วน หมายถึง เหล็กแผ่นที่ทำเป็นม้วนมีหน้ากว้างตั้งแต่ 600 มิลลิเมตรขึ้นไป
- 3 เหล็กแผ่นแถบ ซึ่งต่อไปในมาตรฐานนี้จะเรียกว่า เหล็กแผ่นแถบ หมายถึง เหล็กแผ่นม้วนที่ตัดแบ่งตามยาวมีหน้ากว้างน้อยกว่า 600 มิลลิเมตร
- 4 เหล็กแผ่นชนิดแผ่นหนา ซึ่งต่อไปในมาตรฐานนี้จะเรียกว่า เหล็กแผ่นหนา หมายถึง เหล็กแผ่นที่ตัดแบ่งเป็นแผ่นหรือที่ทำเป็นแผ่น มีความหนาระบุตั้งแต่ 3.15 มิลลิเมตรถึง 130 มิลลิเมตร
- 5 เหล็กแผ่นชนิดแผ่นบาง ซึ่งต่อไปในมาตรฐานนี้จะเรียกว่า เหล็กแผ่นบาง หมายถึง เหล็กแผ่นที่ตัดแบ่งเป็นแผ่นหรือที่ทำเป็นแผ่น มีความหนาระบุน้อยกว่า 3.15 มิลลิเมตร
- 6 ขอบรีด (mill edge) หมายถึง ขอบของเหล็กแผ่นที่เกิดจากการรีดร้อนโดยไม่มีการตกแต่ง ขอบรีดนี้อาจบางและฉีกเป็นบางแห่ง หรือมีความไม่สม่ำเสมอ หรือร้าว
- 7 ขอบตัด (cut edge) หมายถึง ขอบของเหล็กแผ่นที่เกิดจากการตัด หลังจากการรีดร้อน
- 8 ขอบตัดปกติ (normal cut edge) หมายถึง ขอบของเหล็กแผ่นที่เกิดจากการตัดเหล็กแผ่นครั้งแรกเพื่อให้ได้ความกว้างและความยาว ตามที่กำหนด
- 9 ขอบตัดแต่งซ้ำ (resheared or fine cut edge) หมายถึง ขอบของเหล็กแผ่นที่เกิดจากการตัดเหล็กแผ่นอีกครั้งหลังจากการตัดครั้งแรก

10 ขอบตัดชอย (slitted edge) หมายถึง ขอบของเหล็กแผ่นที่เกิดจากการตัดแบ่งเหล็กแผ่นให้ได้ขนาดตามข้อตกลงในการซื้อขาย

ชนิด ลักษณะขอบ และชั้นคุณภาพ

1 เหล็กแผ่นแบ่งเป็น 4 ชนิด คือ

1.1 เหล็กแผ่นม้วน

1.2 เหล็กแผ่นแถบ

1.3 เหล็กแผ่นหนา

1.4 เหล็กแผ่นบาง

2 เหล็กแผ่นแบ่งตามลักษณะขอบ เป็น 2 ลักษณะ คือ

2.1 ขอบรีด

2.2 ขอบตัด

3 เหล็กแผ่นแบ่งตามการใช้งาน เป็น 4 ชั้นคุณภาพ คือ

3.1 HR 1 สำหรับใช้งานทั่วไป (commercial quality)

3.2 HR 2 สำหรับใช้งานขึ้นรูป (drawing quality)

3.3 HR 3 สำหรับใช้งานขึ้นรูปลึก (deep drawing quality)

3.4 HR 4 สำหรับใช้งานขึ้นรูปลึกพิเศษ (deep drawing quality special killed) เป็นเหล็กกล้าเนื้อแน่น (killed steel) ที่เกิดจากการเติมธาตุบางอย่างลงไป เช่น อะลูมิเนียม ไทเทเนียม ฯลฯ

ส่วนประกอบทางเคมี

1 ส่วนประกอบทางเคมี

ส่วนประกอบทางเคมีเมื่อวิเคราะห์จากแก้ว (ให้ไว้เป็นข้อแนะนำ) ให้เป็นไปตามตารางที่ 1 เมื่อวิเคราะห์จากผลิตภัณฑ์ยอมให้มีค่าสูงกว่าค่าสูงสุดของตารางที่ 1 ตามเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนในตารางที่ 2

การทดสอบให้ใช้วิธีวิเคราะห์ทางเคมีทั่วไปหรือวิธีอื่นที่ให้ผลเทียบเท่า

ตารางที่ ก.1 ส่วนประกอบทางเคมีเมื่อวิเคราะห์จากแก้ว

หน่วยเป็นร้อยละ

ชั้นคุณภาพ	ส่วนประกอบเคมี			
	คาร์บอนสูงสุด	แมงกานีสสูงสุด	ฟอสฟอรัสสูงสุด	กำมะถันสูงสุด
HR 1	0.15	0.60	0.050	0.050
HR 2	0.12	0.50	0.040	0.040
HR 3	0.10	0.45	0.030	0.030
HR 4	0.08	0.45	0.030	0.030

ตารางที่ ก.2 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของส่วนประกอบทางเคมีเมื่อวิเคราะห์จากผลิตภัณฑ์

หน่วยเป็นร้อยละ

ส่วนประกอบ	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อน
คาร์บอน	0.03
แมงกานีส	0.03
ฟอสฟอรัส	0.010
กำมะถัน	0.010

คุณลักษณะที่ต้องการ

1 ลักษณะทั่วไป

เหล็กแผ่นต้องมีผิวเรียบเกลี้ยง สม่ำเสมอ ปราศจากตำหนิที่จะเป็นผลเสียหายต่อการใช้งาน ไม่มีสะเก็ดออกไซด์ที่ฝังตัวในเนื้อเหล็ก (rolled-in scale) และต้องไม่มีการแยกชั้น (lamination) ของเนื้อเหล็ก

การทดสอบให้ทำโดยการตรวจพินิจ หรือวิธีอื่นที่ให้ผลเทียบเท่า

2 สมบัติทางกล

2.1 ความต้านแรงดึงและความยืด

ให้เป็นไปตามตารางที่ ก.3

2 การดัดโค้ง (เฉพาะชั้นคุณภาพ HR 1)

เมื่อทดสอบตามการดัดโค้ง (เฉพาะชั้นคุณภาพ HR 1) ตาม ISO 7348 โดยดัดโค้ง 180 องศา และปลายทั้งสองขนานกันโดยมีระยะห่างตามที่กำหนดในตารางที่ ก.4 แล้ว ต้องไม่มีรอยร้าวตรงส่วนโค้งด้านนอกของชิ้นทดสอบ โดยตัดชิ้นทดสอบตั้งฉากกับแนวการรีด ยกเว้นกรณีที่เหล็กแผ่นมีความกว้างไม่เพียงพอที่จะตัดชิ้นทดสอบได้ ให้ตัดตามแนวการรีด

ตารางที่ ก.3 ความต้านแรงดึงและความยืด

ชั้น คุณภาพ	ความ ต้านทานแรง ดึง เมกะพาส คัล	ความยืดร้อยละ ต่ำสุด				
		ความหนา น้อยกว่า 3 mm		ความหนา ตั้งแต่ 3 mm ถึง 6 mm		ความหนา มากกว่า 6 mm
		$L_0 = 80$ mm	$L_0 = 50$ mm	$L_0 = 5.65\sqrt{S_0}$ mm	$L_0 = 50$ mm	$L_0 = 5.65\sqrt{S_0}$ mm
HR 1	-	-	-	-	-	-
HR 2	270-430	25	26	28	29	*
HR 3	270-370	28	29	32	33	*
HR 4	270-390	28	29	32	33	*

ตารางที่ ก.4 การตัดโค้ง

หน่วยเป็นมิลลิเมตร

ความหนาของชิ้นทดสอบ	ระยะห่างจากปลายทั้งสอง
ไม่เกิน 3.2	ติดกัน
มากกว่า 3.2	ความหนาชิ้นทดสอบ

ภาคผนวก ข

มาตรฐาน JIS Z2201 No.5

ตารางที่ ข.1 ประเภทชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน JIS Z2201

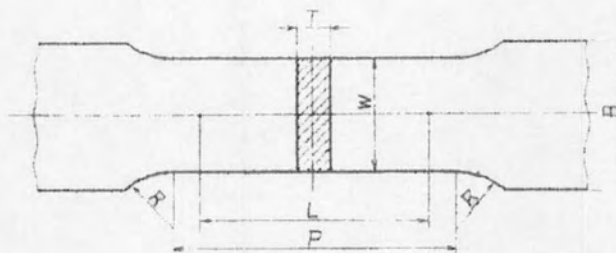
Form of test piece	Flat form test piece	Bar form test piece	Tubular form test piece	Arc section test piece	Wire form test piece
Proportional test piece	No.6, No.7 No.14 B	No.2, No.3 No.14 A	No.14 C	No.14 B	—
Non-proportional test piece	No.1 A, No.1 B, No.5, No.13 A, No.13 B	No.4, No.10, No.8 A, No.8 B, No.8 C, No.8 D	No.11	No.12 A, No.12 B, No.12 C	No.9 A, No.9 B

ตารางที่ ข.2 การเลือกมาตรฐานชิ้นงานทดสอบแรงดึง

Product		Test piece		Remark
Form	Dimensions	Proportional	Non-proportional	
Plate, Sheet, Strip	Over 40 mm in thickness	No.14 A	No.4, No.10	For bar form test piece
		No.14 B	—	For flat form test piece
	Over 20 mm to 40 mm incl. in thickness	No.14 A	No.4, No.10	For bar form test piece
		No.14 B	No.1 A	For flat form test piece
	Over 6 mm to 20 mm incl. in thickness	No.14 B	No.1 A No.5	
Over 3 mm to 6 mm incl. in thickness	No.5, No.13 A, No.13 B			
Up to 3 mm incl. in thickness	—			
Bar	—	No.2, No.14 A	No.4, No.10	—
Wire	—	—	No.9 A, No.9 B	—
Pipe	Pipe of small outside dia.	No.14 C	No.11	For tubular form test piece
	Up to 50 mm incl. in outside dia.	No.14 B	No.12 A	For arc section test piece
	Over 50 mm to 170 mm incl. in outside dia.		No.12 B	
	Over 170 mm in outside dia.		No.12 C	
	Over 200 mm in outside dia.	No.14 B	No.5	For flat form test piece
Thick wall pipe	No.14 A	No.4	For bar form test piece	
Casting	—	No.14 A	No.4, No.10	—
	—	—	No.8 A, No.8 B, No.8 C, No.8 D	To be used when elongation value is not required. To be taken from test coupon casted for test piece.
Forging	—	No.14 A	No.4, No.10	—

- (5) No. 5 Test Piece The form and dimensions of this test piece shall conform to Fig. 5.

Fig. 5



Unit: mm

Width W	Gauge length L	Parallel length P	Radius of fillet R	Thickness T
25	50	60 approx.	15 min.	Thickness of material

Remark: In the case of applying this test piece to steel sheets not more than 3 mm thick, the radius R of fillet shall be 20 to 30 mm, and the width B of gripped ends shall be 30 mm or over.

รูปที่ ข.1 ข้อกำหนดชิ้นงานตามมาตรฐาน JIS Z2201 No.5

ภาคผนวก ค

ASTM E112-96

นิยาม

1. ASTM grain size number (G) นิยามตั้งต้นเป็นดังสมการ

$$N_{AE} = 2^{G-1} \quad \text{สมการ ค.1}$$

เมื่อ N_{AE} คือจำนวนเกรนต่อตารางนิ้วที่กำลังขยาย 100 เท่า เพื่อให้ได้จำนวนเกรนต่อตารางมิลลิเมตรที่กำลังขยาย 1 เท่าต้องคูณด้วย 15.50

2. เกรน คือพื้นที่ภายในขอบเขตของขอบ (ตั้งต้น) ที่ถูกตรวจสอบใน 2 มิติของวัสดุที่ถูกขัดเงาหรือปริมาตรที่ถูกปิดล้อมโดยขอบ (ตั้งต้น) ในวัสดุแบบ 3 มิติ ในวัสดุที่ประกอบด้วย twin boundaries (twin) twin จะถูกตัดออกเนื่องจากโครงสร้างในแต่ละด้านของ twin ยังอยู่ในเกรน
3. การนับจุดตัดขอบเกรน การวัดจำนวนจุดตัดที่เส้นทดสอบ (test line) ตัดผ่านขอบเกรน โดยจุดที่เกิดการตัดกัน 3 เส้นจะนับเป็น $1\frac{1}{2}$
4. การนับจุดตัดเกรน เป็นการนับเกรนที่เส้นทดสอบตัดผ่านในชิ้นงานที่ผ่านการขัดเงา (ถ้าเส้นทดสอบสัมผัสขอบเกรนโดยไม่ตัดเกรนจะนับเป็น $\frac{1}{2}$)
5. การนับความยาวจุดตัด เป็นระยะทางระหว่างจุดตัดที่เกิดจากเส้นทดสอบตัดผ่านขอบเกรนซึ่งจุดตัดทั้ง 2 ติดกัน โดยจุดตัดเกรนที่ตำแหน่งใดๆ เนื่องจากการวางเส้นทดสอบแบบสุ่ม

สัญลักษณ์

A = พื้นที่ทดสอบ

\bar{A} = พื้นที่เกรนที่ถูกตัดผ่านเฉลี่ย

\bar{d} = เส้นผ่านศูนย์กลางเกรนเฉลี่ย (ในแนวระนาบ).

\bar{D} = เส้นผ่านศูนย์กลางเกรนเฉลี่ย (ใน 3 มิติหรือแบบปริมาตร)

G = ASTM grain size number.

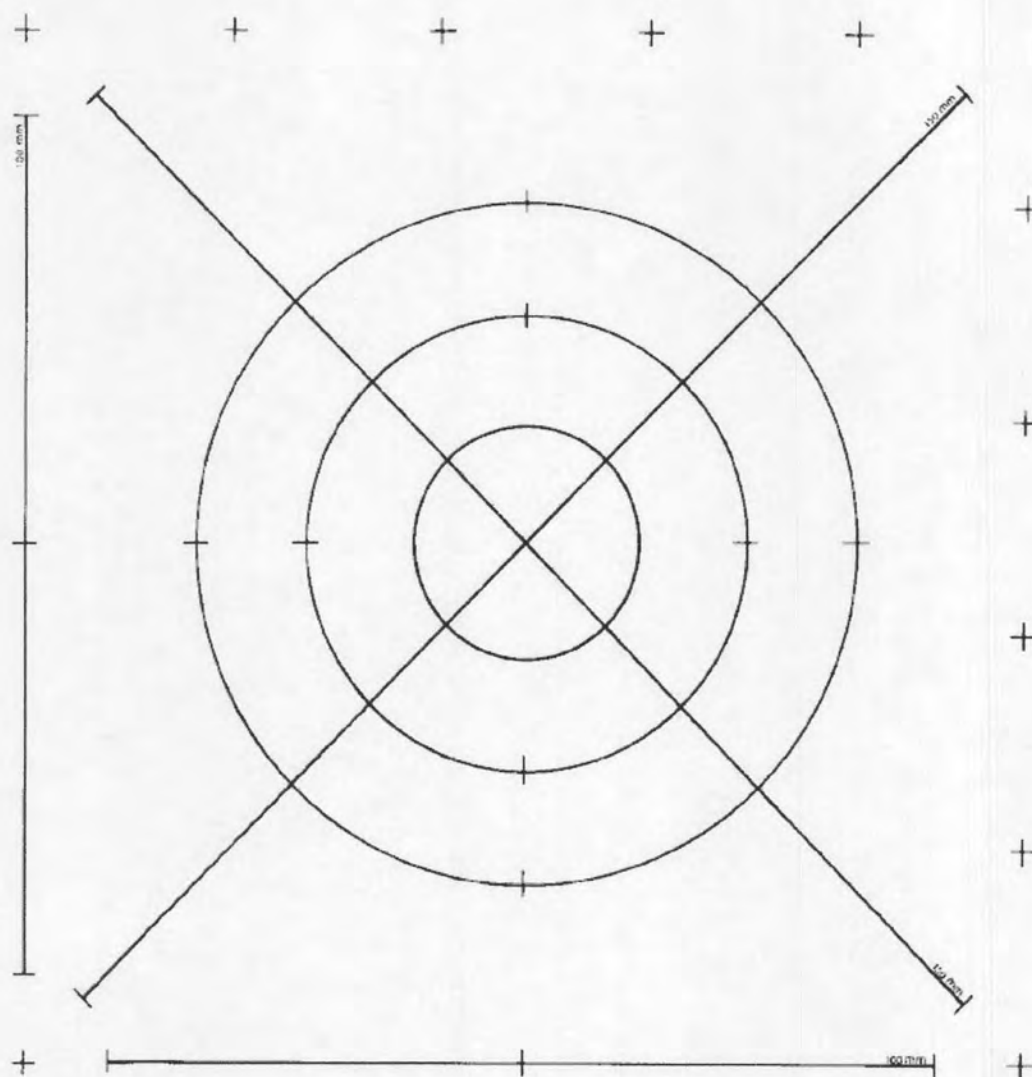
l = ความยาวระหว่างจุดตัดแบบเส้นตรงเฉลี่ย

L = ความยาวของเส้นทดสอบ

M = กำลังขยายที่ใช้

N_L = จำนวนจุดตัดต่อความยาวเส้นทดสอบ

P_L = จำนวนจุดตัดขอบเกรนต่อความยาวเส้นทดสอบ



Circles are:	Circumference, mm,	Diameter, mm
	250.0	79.58
	166.7	53.05
	83.3	26.53
	<hr/>	
	Total 500.0	

รูปที่ ค.1 แบบสำหรับการวัดขนาดเกรนแบบนับจุดตัด
(Test Pattern for Intercept Counting)

วิธีการนับแบบจุดตัดวงกลม (Circular Intercept Procedures)

การใช้เส้นทดสอบเป็นวงกลมแทนการใช้เส้นตรงได้ถูกเสนอโดย Underwood Hillard และ Abrams การเรียงเส้นทดสอบแบบวงกลมจะสะดวกสำหรับการเปลี่ยนแปลงของเกรนที่มีรูปร่างหลายเหลี่ยม (equiaxed grain) โดยไม่มีผลจากตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งของพื้นที่มากเกินไป จุดตัดที่ไม่แนชัดที่ปลายของเส้นทดสอบจะถูกกำจัดออกไป ดังนั้นวิธีการนับแบบจุดตัด

วงกลมจึงเหมาะสมที่สุดที่ใช้เป็นวิธีประจำสำหรับการประมาณค่าขนาดเกรนในการควบคุมคุณภาพ

วิธีการวัดแบบวงกลมเดียวของ Hilliard (*Hilliard Single-Circle Procedure*)

1. เมื่อรูปร่างเกรนไม่เป็นรูปร่างหลายเหลี่ยม แต่มีการบิดเบี้ยวเนื่องจากการแปรรูปหรือกระบวนการอื่นๆ การได้ค่าเฉลี่ยจุดตัดในแนวเส้นตรงที่ใช้เส้นทดสอบตรงที่วัดจากการเรียงตัวหลายต่าง ๆ มาเฉลี่ย ถ้าไม่ระมัดระวังจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ การวงกลมเป็นเส้นทดสอบสามารถกำจัดปัญหานี้ได้เนื่องจากวงกลมจะลากผ่านทุกการเรียงตัวเท่าๆ กันและไม่มี ความคลาดเคลื่อน

2. ขนาดวงกลมต่างที่รู้เส้นรอบวงอาจจะถูกใช้ เส้นรอบวง 100 200 หรือ 250 มม. เป็นที่นิยม เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นทดสอบจะต้องไม่เล็กกว่าขนาดเกรนที่ใหญ่ที่สุดที่ทำการตรวจสอบ ถ้าเส้นทดสอบวงกลมเล็กกว่า 3 เท่าของค่าเฉลี่ยจุดตัดในแนวเส้นตรง การกระจายตัวของจำนวนจุดตัดหรือ... ต่อพื้นที่จะไม่เป็น Gaussian เช่นเดียวกับการใช้วงกลมทดสอบขนาดเล็กที่ไม่เพียงพอเมื่อพื้นที่จำนวนมากถูกพิจารณาเพื่อให้ความแม่นยำสูง จุดอ้างอิงขนาดเล็กมักอยู่ที่ด้านบนของวงกลมเพื่อระบุตำแหน่งที่เริ่มและสิ้นสุดการนับ สุ่มเลือกวงกลมในรูปโครงสร้างที่กำลังขยายที่รู้แน่ชัดและสะดวกและนับจำนวนขอบเกรนที่ติดกับวงกลมในแต่ละวง ใช้วงกลมเพียง 1 วงต่อพื้นที่ 1 พื้นที่ เพิ่มจำนวนพื้นที่ที่ตรวจสอบจนกระทั่งการนับเพียงพอที่ได้ความแม่นยำที่ต้องการ ความแตกต่างในการนับต่อการทดสอบวงกลมจะลดลงเมื่อขนาดวงกลมเพิ่มขึ้น และแน่นอนมีผลต่อความสม่ำเสมอ

3. เช่นเดียวกับวิธีนับจุดตัดทั้งหมด ความแม่นยำของการวัดเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนของการนับเพิ่มขึ้น ความแม่นยำอยู่บนพื้นฐานของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของจำนวนนับจุดตัดหรือ... ต่อพื้นที่โดยทั่วไปสำหรับโครงสร้างจุลภาคทั่วไปส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานดีขึ้นเมื่อการนับจำนวนจุดตัดหรือ... ต่อวงกลมที่ใช้และจำนวนรูปที่ใช้ทั้งหมดเพิ่มขึ้น Hilliard แนะนำให้ใช้วงกลมที่นับจุดตัดได้ประมาณ 35 จุดต่อวงกลมโดยวงกลมทดสอบถูกสุ่มทั่วชิ้นงานใหญ่เท่าที่จะยอมรับได้จนกระทั่งได้จำนวนของการนับที่ต้องการ

วิธีการวัดแบบวงกลม 3 วงของ Abrams (*Abrams Three-Circle Procedure*)

1. อ้างอิงจากข้อมูลการทดลองซึ่งชิ้นงานที่มีจุดตัดทั้งหมด 500 จุดต่อชิ้นงานโดยทั่วไปให้ความแม่นยำที่ยอมรับได้ Abrams ได้พัฒนาวิธีการเฉพาะสำหรับการประเมินขนาดเกรนของเหล็กกล้าในเชิงพาณิชย์ การใช้การทดสอบ chi-square ต่อข้อมูลจริงแสดงให้เห็นว่าความแตกต่างของจำนวนจุดตัดใกล้เคียงกับการกระจายตัวปกติ ทั้งการวัดความแปรผันและขอบเขตความเชื่อมั่นถูกคำนวณสำหรับแต่ละการพิจารณาขนาดเกรนเฉลี่ย

2. รูปแบบการทดสอบประกอบด้วยวงกลมสี่เหลี่ยมที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกันซึ่งมีเส้นรอบวงรวมกันเป็นความยาว 500 มม. ดังรูปที่ ค.1 ใช้รูปแบบอย่างต่อนี้เนื่องกับพื้นที่ที่ผ่านการสุ่มอย่างน้อย 5 พื้นที่และกระจายทั่วทั้งชิ้นงาน แยกกันบันทึกผลการนับจำนวนจุดตัดต่อรูปแบบในแต่ละการทดสอบ จากนั้นพิจารณาเทียบค่าเฉลี่ยจุดตัดในแนวเส้นตรง โดยใช้ส่วนเบี่ยงมาตรฐานที่มีความเชื่อมั่นที่ 95 % และ % ความแม่นยำสัมพัทธ์ ในการใช้งานส่วนใหญ่ความแม่นยำสัมพัทธ์ที่ 10% หรือน้อยเป็นระดับความแม่นยำที่ยอมรับได้ แต่ความแม่นยำสัมพัทธ์ที่คำนวณได้เป็นที่ยอมรับได้สำหรับการใช้งาน ต้องเพิ่มพื้นที่จะนับจนกระทั่งสามารถคำนวณความแม่นยำสัมพัทธ์เป็นที่ยอมรับได้ วิธีการเฉพาะจะเป็นดังต่อไปนี้

2.1 ตรวจสอบโครงสร้างเกรนและเลือกกำลังขยายที่จะให้จำนวนนับตั้งแต่ 40 ถึง 100 จุดตัดต่อวงกลม 1 รูป เนื่องจากเป้าหมายที่ต้องการคือต้องมีจุดตัดทั้งหมดอยู่ประมาณ 400 ถึง 500 จุดตัด กำลังขยายที่เหมาะสมที่จะให้จำนวนจุดตัดที่ต้องการคือ 100 จุดตัดต่อ 1 รูป อย่างไรก็ตามเมื่อจำนวนจุดตัดต่อรูปเพิ่มขึ้นจาก 40 เป็น 100 จุด ความผิดพลาดจากการนับก็เพิ่มขึ้นตามเนื่องจากรูปร่างของเกรนจะแปรผันต่างกันในแต่ละพื้นที่ ต้องใช้พื้นที่อย่างน้อยที่สุดตั้งแต่ 5 ตำแหน่งที่กระจายทั่วทั้งชิ้นงานที่เลือกทดสอบ นัก metallograph บางคนมักจะใช้การนับ 10 ตำแหน่งและแต่ละตำแหน่งมีจุดตัดประมาณ 40 ถึง 50 จุด โดยรูปร่างเกรนส่วนใหญ่จำนวนจุดตัดทั้งหมด 400 ถึง 500 จุดทั้ง 5 ถึง 10 ตำแหน่งให้ความแม่นยำสัมพัทธ์ดีกว่า 10% รูปที่ ค.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจุดตัดเฉลี่ย และขนาดเกรนแบบ ASTM No. ที่ได้จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยเป็นฟังก์ชันของกำลังขยาย

2.2 การเลือกแบบสุ่มตำแหน่งสำหรับการวัดและใช้รูปแบบทดสอบกับรูป รูปแบบทดสอบที่โปร่งใสถูกใช้โดยตรงกับภาพสะท้อนกระจกหรือรูปโครงสร้างจุลภาค เมื่อต้องการบันทึกข้อมูลอย่างถาวร การนับโดยตรงใช้ reticle ในเลนส์ตาที่มีขนาดพอเหมาะ แต่จะมีปัญหาคือความยากในการนับให้ถูกต้องที่ความหนาแน่นของจุดที่ต้องการ การนับจนครบในแต่ละวงกลมใช้การบันทึกด้วยมือเพื่อรวบรวมจำนวนจุดตัดทั้งหมดในรูปแบบทดสอบ การนับด้วยมือจึงจำเป็นต้องหลีกเลี่ยงความลำเอียงของผลระหว่างค่าที่ได้จริงกับค่าที่ต้องการให้เป็น และเพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากการจำ ผู้ทดสอบควรระวังหลีกเลี่ยงที่จะมีค่าที่ต้องการให้เป็น เมื่อรวบรวมการนับถูกใช้ จำนวนของจุดตัดใดๆของวงกลมกับรอยต่อของ 3 เกรนเป็น 2 แทนที่ค่าที่ถูกต้องต้องเป็น $1\frac{1}{2}$ ความคลาดเคลื่อนก็มีค่าเพียงเล็กน้อย

3. สำหรับการนับจุดในแต่ละพื้นที่ คำนวณ N_L หรือ PL ตามสมการต่อไปนี้

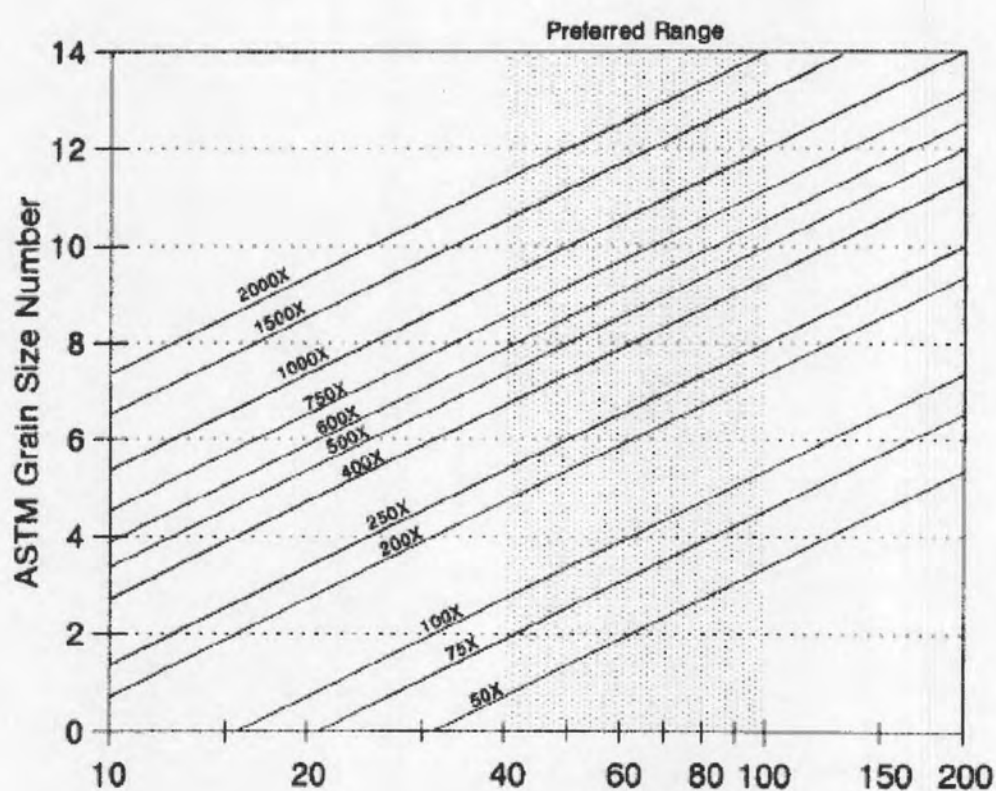
$$\overline{N}_L = \frac{N_i}{L/M} \quad \text{สมการที่ ค.2}$$

$$\bar{P}_L = \frac{P_i}{L/M} \quad \text{สมการที่ ค.3}$$

เมื่อ N_i และ P_i เป็นจำนวนจุดตัดในพื้นที่ที่หาและ L เป็นความยาวเส้นทดสอบทั้งหมด (500 มม.) และ M เป็นกำลังขยาย.

4. คำนวณค่าเฉลี่ยความยาวจุดตัดในแนวเส้นตรง (\bar{l}) สำหรับแต่ละพื้นที่ที่หาดังสมการ

$$\bar{l} = \frac{1}{N_L} = \frac{1}{P_L} \quad \text{สมการที่ ค.4}$$



รูปที่ ค.2 จำนวนจุดตัดเฉลี่ยบนแบบวัด 500 มม.

ตารางที่ ค.1 เทียบขนาดเกรนหน่วย ASTM No. เป็นไมครอน

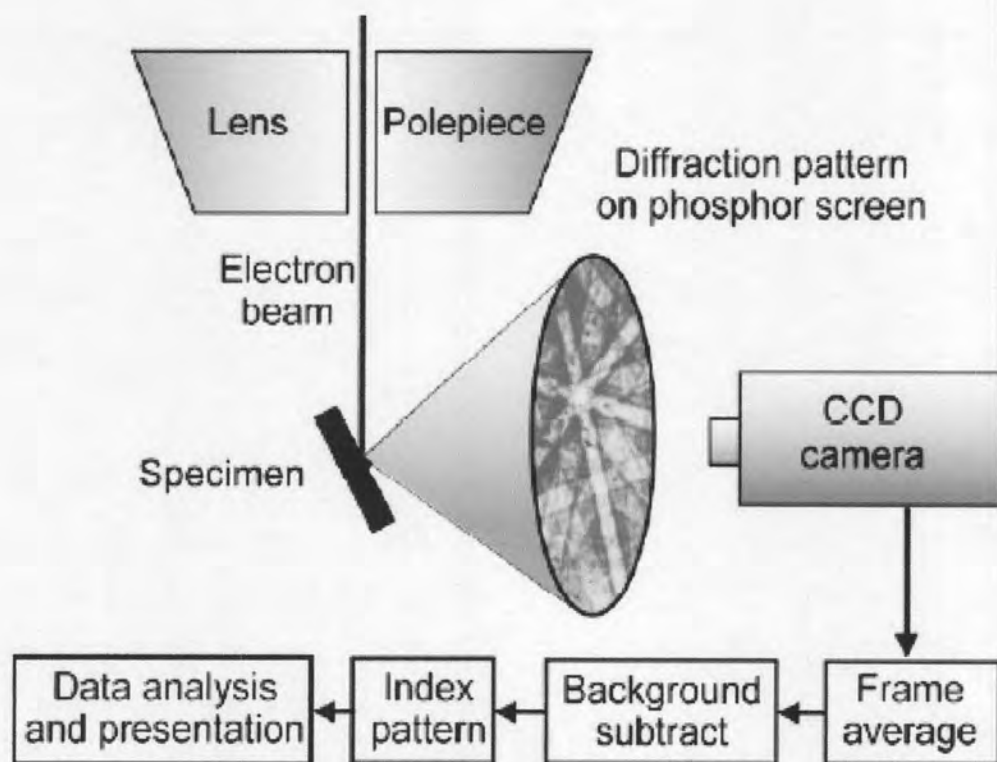
Grain Size No. G	\bar{N}_A Grains/Unit Area		\bar{A} Average Grain Area		\bar{d} Average Diameter		\bar{r} Mean Intercept		\bar{N}_L
	No./in. ² at 100X	No./mm ² at 1X	mm ²	μm ²	mm	μm	mm	μm	No./mm
00	0.25	3.88	0.2581	258064	0.5080	508.0	0.4525	452.5	2.21
0	0.50	7.75	0.1290	129032	0.3592	359.2	0.3200	320.0	3.12
0.5	0.71	10.96	0.0912	91239	0.3021	302.1	0.2691	269.1	3.72
1.0	1.00	15.50	0.0645	64516	0.2540	254.0	0.2263	226.3	4.42
1.5	1.41	21.92	0.0456	45620	0.2136	213.6	0.1903	190.3	5.26
2.0	2.00	31.00	0.0323	32258	0.1796	179.6	0.1600	160.0	6.25
2.5	2.83	43.84	0.0228	22810	0.1510	151.0	0.1345	134.5	7.43
3.0	4.00	62.00	0.0161	16129	0.1270	127.0	0.1131	113.1	8.84
3.5	5.66	87.68	0.0114	11405	0.1068	106.8	0.0951	95.1	10.51
4.0	8.00	124.00	0.00806	8065	0.0898	89.8	0.0800	80.0	12.50
4.5	11.31	175.36	0.00570	5703	0.0755	75.5	0.0673	67.3	14.87
5.0	16.00	248.00	0.00403	4032	0.0635	63.5	0.0566	56.6	17.68
5.5	22.63	350.73	0.00285	2851	0.0534	53.4	0.0476	47.6	21.02
6.0	32.00	496.00	0.00202	2016	0.0449	44.9	0.0400	40.0	25.00
6.5	45.25	701.45	0.00143	1426	0.0378	37.8	0.0336	33.6	29.73
7.0	64.00	992.00	0.00101	1008	0.0318	31.8	0.0283	28.3	35.36
7.5	90.51	1402.9	0.00071	713	0.0267	26.7	0.0238	23.8	42.04
8.0	128.00	1984.0	0.00050	504	0.0225	22.5	0.0200	20.0	50.00
8.5	181.02	2805.8	0.00036	356	0.0189	18.9	0.0168	16.8	59.46
9.0	256.00	3968.0	0.00025	252	0.0159	15.9	0.0141	14.1	70.71
9.5	362.04	5611.6	0.00018	178	0.0133	13.3	0.0119	11.9	84.09
10.0	512.00	7936.0	0.00013	126	0.0112	11.2	0.0100	10.0	100.0
10.5	724.08	11223.2	0.000099	99.1	0.0094	9.4	0.0084	8.4	118.9
11.0	1024.00	15872.0	0.000063	63.0	0.0079	7.9	0.0071	7.1	141.4
11.5	1448.15	22446.4	0.000045	44.6	0.0067	6.7	0.0060	5.9	168.2
12.0	2048.00	31744.1	0.000032	31.5	0.0056	5.6	0.0050	5.0	200.0
12.5	2896.31	44892.9	0.000022	22.3	0.0047	4.7	0.0042	4.2	237.8
13.0	4096.00	63488.1	0.000016	15.8	0.0040	4.0	0.0035	3.5	282.8
13.5	5792.62	89785.8	0.000011	11.1	0.0033	3.3	0.0030	3.0	336.4
14.0	8192.00	126976.3	0.000008	7.9	0.0028	2.8	0.0025	2.5	400.0

ภาคผนวก ง

การวัด texture โดยใช้ EBSD และการแสดงผล

ง.1 การวัด texture

วิธีการวัด texture มีทั้งวิธีการที่เป็นแบบมหภาค (macro-) และจุลภาค (micro-) การวัดแบบมหภาคจะใช้เครื่องมือที่เป็นการกระเจิงของรังสีเอกซ์และนิวตรอน ในขณะที่การวัดแบบจุลภาคจะใช้ EBSD (electron backscatter diffraction) เป็นเครื่องมือวัดหลัก



รูปที่ ง.1 ส่วนประกอบทั่วไปของ EBSD ใน SEM โดยแสดงให้เห็นเส้น kikuchi pattern ของ EBSD ที่สะท้อนมาจากฉากฟอสเฟออร์ [7]

EBSD ที่เป็นส่วนต่อเพิ่มของ SEM นั้นเป็นเครื่องมือที่มีความสำคัญต่อการศึกษาลักษณะของ crystallographic texture สำคัญที่สุดที่มี texture วิธีการนี้ใช้การวิเคราะห์รูปแบบ EBSD (EBSD pattern) โดยเครื่องคอมพิวเตอร์แบบอัตโนมัติเพื่อสร้างข้อมูลของ texture แบบจุดต่อจุดทั่วทั้งพื้นที่ที่เลือกตรวจสอบโดยมีความเร็วในการวัดได้ถึง 150 จุดต่อวินาที ลักษณะการติดตั้ง

EBSD เป็นไปดังรูปที่ ง.1 ซึ่งประกอบด้วยกล้องที่มีความไวสูงและระบบการประมวลผลภาพเพื่อการสร้างรูปแบบเฉื่อยและลบบพื้นหลัง สำหรับ EBSD ต้องใช้ซอฟต์แวร์ที่ซึ่งต้องวิเคราะห์ลักษณะ texture ไปพร้อมกับการบันทึกข้อมูล การวางชิ้นงานต้องวางทำมุม (ประมาณ 60-70°C) เพื่อให้ลำแสงอิเล็กตรอนรวมกันเพื่อสร้าง kikuchi pattern หรือรูปแบบการกระเจิงของอิเล็กตรอนที่จุดนั้นดังรูป ง.1 การสร้างแผนที่ของโครงสร้างจุลภาคใช้ข้อมูลที่ได้จากรูปแบบการกระเจิง (diffraction pattern) แต่ละรูป ตำแหน่งที่ถูกตรวจสอบถูกเรียงในตารางและลำอิเล็กตรอนของ SEM ถูกสั่งให้เคลื่อนไปแต่ละจุดเป็นรอบๆ หรือลำอิเล็กตรอนอยู่กับที่แต่แทนจับชิ้นงานขยับ ในแต่ละชั้น พิกัดของจุดและข้อมูล texture ถูกบันทึกและเก็บไว้โดยซอฟต์แวร์ จากข้อมูลเหล่านี้แผนที่โครงสร้างจุลภาคถูกสร้างเพื่ออธิบายข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวกับ texture ของโครงสร้างจุลภาค ตัวอย่างเช่น ข้อมูลอาจถูกใช้แสดงการกระจายตัวของส่วนประกอบ texture ของพื้นที่ที่ถูกตรวจสอบเพื่อคำนวณการกระจายตัวของเกรนเดี่ยวที่ผิดปกติของเกรน (grain misorientation) ขนาดเกรนเฉลี่ย และการกระจายตัว และที่มาของตัวแปรที่สำคัญ

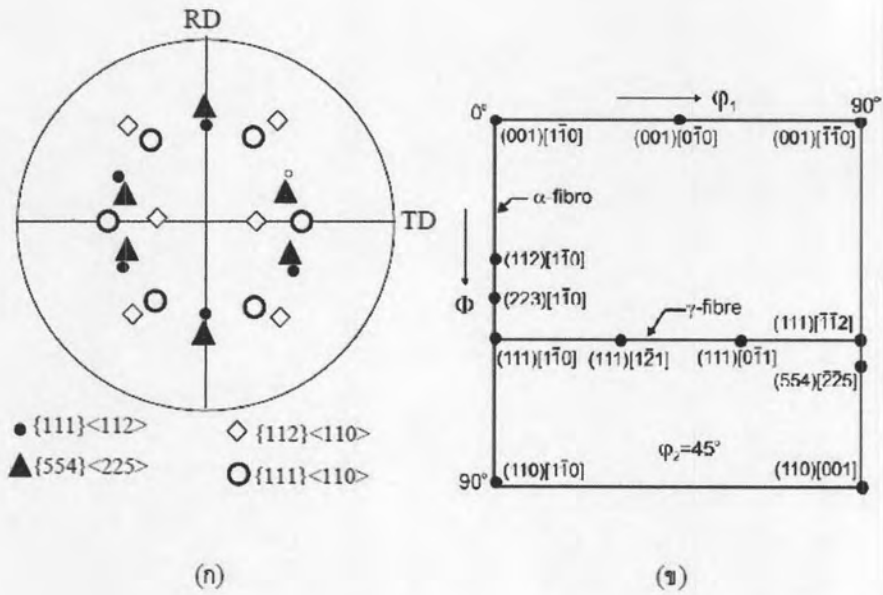
ง.2 การแสดงผลการวัด texture ของโลหะแผ่น

การเรียงตัวของเกรนในวัสดุแผ่นสามารถระบุเป็น $(hkl)[uvw]$ เมื่อ (hkl) เป็นดัชนีมิลเลอร์ของระนาบเฉพาะของเกรนซึ่งขนานกับระนาบที่ประกอบด้วยทิศทางรีดและตั้งฉากกับการรีด ในขณะที่ $[uvw]$ เป็นดัชนีมิลเลอร์ของทิศทางเฉพาะในเกรนซึ่งขนานกับทิศทางรีด สำหรับวัสดุแผ่นที่ถูกผลิตโดยวิธีการ Thermo-Mechanical Processing (TMP) วิธีการแสดงผลการวัด texture ใช้วิธี orientation distribution function (ODF) เป็นวิธีที่ดีที่สุดเนื่องจากส่วนประกอบหลักของ texture ในโลหะแผ่นส่วนใหญ่กระจายตัวเป็นหลอด หรือเป็นเส้นใยในพื้นที่ 3 มิติ ในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำแผ่นรีดเย็นและผ่านการอบอ่อน วิธีที่แสดงผลการวัด texture ได้ดีคือ (200) pole figure ดังรูปที่ ง.2ก. หรือ ส่วน $\varphi_2 = 45^\circ$ ใน Euler Space ดังรูป ง.2ข

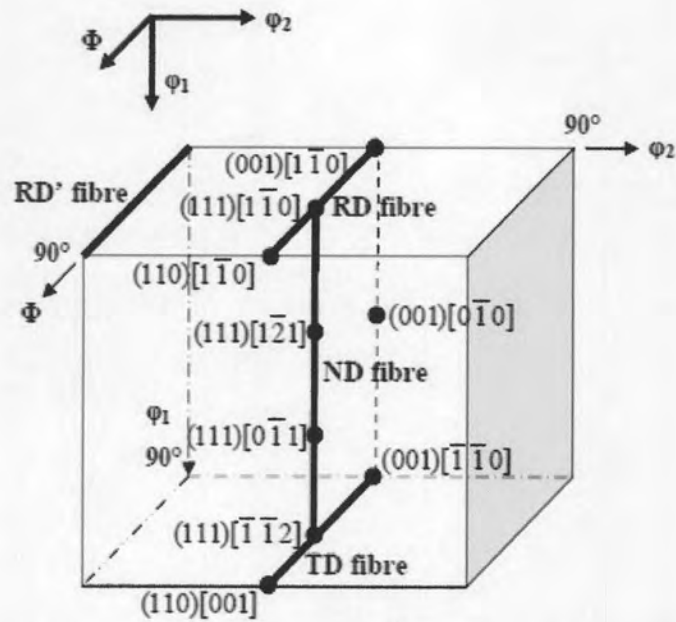
Texture หลักของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำคือ เส้นใย α γ η และ ϵ ดังรูปง.3

- (1) เส้นใย α หรือเส้นใยตามทิศทางรีด วิ่งจาก $\{001\}\langle 110 \rangle$ ถึง $\{111\}\langle 110 \rangle$ ตาม $\langle 110 \rangle$ ขนานกับทิศทางความหนา (ND) และสามารถแสดงผลเป็น $\{hkl\}\langle 110 \rangle$
- (2) เส้นใย γ หรือเส้นใยตามทิศทางความหนา วิ่งจาก $\{111\}\langle 110 \rangle$ ถึง $\{111\}\langle 231 \rangle$ และ $\{111\}\langle 112 \rangle$ ตาม $\langle 111 \rangle$ ขนานกับทิศทางความหนาซึ่งสามารถอธิบายเป็น $\{111\}\langle uvw \rangle$
- (3) เส้นใย η วิ่งจาก $\{001\}\langle 100 \rangle$ ถึง $\{011\}\langle 100 \rangle$ ตาม $\langle 100 \rangle$ ขนานกับทิศทางความหนา

(4) เส้นใย ϵ หรือเส้นใยตามทิศทางตั้งฉากกับการรีด วิ่งจาก $\{001\}\langle 110 \rangle$ ถึง $\{111\}\langle 112 \rangle$ ตาม $\langle 110 \rangle$ ขนานกับทิศทางตั้งฉากกับการรีด



รูปที่ 2 (ก) (200) pole figure แสดงการเรียงตัวที่สำคัญบางตัวของเหล็กกล้าลากรีนรูป
 ลึก (ข) ส่วน $\phi_2 = 45^\circ$ ใน Euler Space แสดงการเรียงตัวและเส้นในที่สำคัญ [7]



รูปที่ 3 ส่วน $90^\circ \times 90^\circ \times 90^\circ$ ของ Euler space ที่แสดงตำแหน่งของการเรียงตัวและเส้น
 ใยที่สำคัญในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ [7]

ง.3 ชนิดของ texture

ง.3.1 texture จากการหล่อ

3 ส่วนอาจเกิดขึ้นในระหว่างการหล่อซึ่งก็คือ chill zone ที่ติดกับผนังแม่พิมพ์ columnar zone และ central equiaxed zone เกือบส่วนใหญ่ใน chill zone และ central equiaxed zone มี texture อย่างกระจัดกระจาย แต่ใน columnar zone มี texture ที่มากชัดเจน ตัวอย่างเช่น columnar zone ของโลหะที่เป็นลูกบาศก์ส่วนใหญ่มีทิศทาง $\langle 100 \rangle$ ขนานกับขอบของแม่พิมพ์ ผลที่ตามมาคือทิศทางการโตของ dendrite สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำจำนวนของการเปลี่ยนแปลงเฟสที่เกิดในระหว่างการเย็นตัว ($\delta \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$) ซึ่งมีแนวโน้มทำให้ texture เริ่มต้นแยกลง

ง.3.2 texture จากการเปลี่ยนเฟส

เมื่อเหล็กกล้าถูกรีดร้อนในช่วงที่เป็นออสเตนไนต์ซึ่งเป็นช่วงที่มีอุณหภูมิสูง ออสเตนไนต์อาจจะ recrystallize เพื่อสร้าง texture $\{100\}\langle 001 \rangle$ ซึ่งในการเปลี่ยนเป็นเฟสเฟอร์ไรต์จะสร้าง texture $\{100\}\langle 011 \rangle$ การ recrystallization ของออสเตนไนต์ระหว่างการรีดร้อนสามารถถูกยับยั้งได้ในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

ง.3.3 texture ที่เกิดจากแปรรูป

การเปลี่ยนการเรียงตัวซึ่งเกิดขึ้นในโลหะที่เป็นพหุผลึกในระหว่างการรีดเป็นผลมาจากการแปรรูปที่เกิดขึ้นมีระบบการเลื่อน (slip system) หรือ twin system ที่แน่นอน ความแข็งแรงของ texture และความสมดุระหว่าง texture ต่างๆหลังการรีดขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัวเช่น texture ดั้งเดิมของวัสดุ ปริมาณการแปรรูป อุณหภูมิในการแปรรูป โครงสร้างผลึก พลังงานการเรียงตัว (stacking fault energy) ขนาดเกรนและรูปร่างเกรนดั้งเดิม และการมีอยู่ของ second phase

มีการแปรรูป 2 รูปแบบคือ การเลื่อนและเฉือนซึ่งทำให้เกรนเปลี่ยนรูปร่างในระหว่างการแปรรูป ในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำการเลื่อนเป็นกระบวนการหลักในระหว่างการรีดเย็น และเกิดขึ้นทิศทางที่เป็น close packed $\langle 111 \rangle$ โดย pencil glide ระนาบที่เลื่อนอาจจะเป็นระนาบใดๆต่อไปนี้ $\{110\}$ $\{112\}$ หรือ $\{123\}$ การเปลี่ยนไปของ texture การรีดเย็นประกอบด้วย การเรียงตัว 2 แบบหลักคือ เส้นใย α และเส้นใย γ ส่วน texture อื่นอาจจะปรากฏขึ้นมาบ้างขึ้นอยู่กับโครงสร้างจุลภาคดั้งเดิม และปริมาณการแปรรูป

ง.3.4 texture จากการรีดเย็นและอบอ่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

Texture ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหลังการรีดเย็นและอบอ่อนส่วนใหญ่ประกอบด้วยเส้นใย α และเส้นใย γ ซึ่งถูกควบคุมโดยส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า hot band texture และขนาดเกรน อุณหภูมิมีวน ปริมาณการรีดเย็นและอัตราการให้ความร้อนในระหว่างการอบอ่อน ซึ่งแสดงดังตารางที่ ง.1

ตารางที่ ง.1 ตัวแปรที่มีผลต่อเกิด texture ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ [7]

Parameters	Low Carbon Steel		IF Steel Batch or Continuous Annealing
	Batch Annealing	Continuous Annealing	
Carbon content	Low (*)	Low (**)	Low (***)
Manganese content	Low (*)	Low (**)	Low (***)
Microalloying (Al, Nb or Ti)	Al (***)	AL (#)	Nb/Ti (***)
Soaking temperature for hot rolling	High (***)	Low (*)	Low (*)
Hot rolling schedule	(#)	(#)	(**)
Finish rolling temperature	> A ₃ (**)	> A ₃ (***)	> A ₃ or < A ₁ (**)
Coiling temperature after hot rolling	Low <600°C (***)	High, >700°C (***)	High (*)
Cold rolling reduction	~ 70%	~ 85%	~ 90%
Heating rate of anneal	20-50 K/h	5-20 K/s (**)	(#)
Maximum temperature of anneal	~700°C	~850°C	~900°C
IF - Interstitial Free			
(#) not critical; (*) significant; (**) important; (***) vital.			

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ – นามสกุล	นายพงศธร ตั้งฤกษ์วราสกุล
วัน – เดือน – ปีเกิด	30 พฤษภาคม 2526
ที่อยู่	134/5 ถ.สุราษฎร์-นาสาร ต.ขุนทะเล อ.เมือง จ.สุราษฎร์ธานี 84100
วุฒิการศึกษา	ประถมศึกษา โรงเรียนอนุบาลปัตตานี ปี 2535 มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี ปี 2541 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษา ปี 2544 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปี 2548
โทรศัพท์ติดต่อ	089-180-7816