

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14
2-3 พฤศจิกายน 2543 โรงแรมโนโวเทล เชียงใหม่

การศึกษาเปรียบเทียบความแข็งแรงต่อขนาดและรูปร่างของแกรไฟต์ในเหล็กหล่อสีเทา A Comparative Study of Strengthening on Size and Shape of Graphite Gray Cast Iron

กัมทวัชรวิทย์ พลุปรารักษ์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)

อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก 26120

โทร.6641000 ต่อ 2055, โทรสาร 037 - 322609

E-mail : kanvarit@psm.swu.ac.th

Ganwarich Pluphrach

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University (Ongkharak)

Ongkharak, Nakhonnayok, Thailand 26120

Tel 6641000 Ext 2055, Fax 037 - 322-609

E-mail : kanvarit@pssm.ac.th

บทคัดย่อ

ปัจจุบัน เหล็กหล่อสีเทา มีความสำคัญมากในอุตสาหกรรม เช่น การผลิตชิ้นส่วนรถยนต์และเครื่องจักร การศึกษาถึงอิทธิพลของขนาดและรูปร่างของแกรไฟต์ ที่มีผลต่อความแข็งแรงของเหล็กหล่อสีเทา เมื่อเหล็กหล่อสีเทาเย็นตัวโดยสมบูรณ์ภายในแบบหล่อทราย โดยพิจารณาถึงสมบัติทางกลเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมของซิลิกอน (Si) ครั้งละ 0.15% และ 0.5% ขึ้นงานทดสอบมีความยาว 500 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร ใช้เวลาเย็นตัวสมบูรณ์ในแบบหล่อทราย 0.883 นาที

จากการทดลองพบว่า เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงธาตุผสมซิลิกอนให้เพิ่มขึ้น ลักษณะโครงสร้างของเหล็กหล่อสีเทา จะมีผลึกแกรไฟต์ เป็นเส้นยาวและใหญ่ขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของคาร์บอนด้วย และเมื่อทำการทดสอบสมบัติทางกล พบว่าความแข็งแรงและความต้านทานแรงดึงจะลดลง โดยเหล็กที่มีความเค้นแรงดึงต่ำสุด คือ 98.82 N/mm² เป็นเหล็กที่ประกอบไปด้วยส่วนผสมของ (C) 2.61%, (Si) 2.17%, (P) 0.025% และเหล็กที่มีความเค้นแรงดึงสูงสุด คือ 365.84 N/mm² และความแข็งสูงสุด คือ 220 (HB) เป็นเหล็กหล่อที่ประกอบไปด้วยส่วนผสมของ (C) 2.84%, (Si) 1.46%, (P) 0.025% ส่วนเหล็กที่มีความแข็งต่ำสุด คือ 121 (HB) เป็นเหล็กหล่อที่ประกอบไปด้วย ส่วนผสมของ (C) 3.47%, (Si) 3.79%, (P) 0.025% ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ลักษณะของผลึกแกรไฟต์ ที่มีขนาดเล็ก สั้น กระจายกันอย่างสม่ำเสมอจะมีความแข็งแรงมากที่สุด และในทางตรงข้ามกัน ลักษณะของผลึกแกรไฟต์ ที่มีขนาดใหญ่ ยาว กระจายกันอย่างไม่สม่ำเสมอจะมีความแข็งแรงน้อยที่สุด

ABSTRACT

At present, Gray Cast Iron is very important for industry, for example, the production of the mobile parts and machine. The study is about the influence of the size and shape of graphite which has an effect on the strength of Gray Cast Iron. When it is completely cool in a sand mould. When we consider the mechanical qualification, if the mixture ratio of silicon (Si) is changed by 0.15% and 0.5% each time, the experimental object is 500 mm. Long 30 mm. In diameter, and it takes 0.883 minute to be completely cool in the sand mould.

From the experiment, increasing the silicon mixture cause the structure of the Gray Cast Iron change the crystal shape of Graphite to a longer and bigger one. It depends on the quantity of Carbon. When we experiment mechanical qualification, we find that the lowest tensile stress in 98.82 N/mm². When the Gray Cast Iron is composed of (C) 2.61%, (Si) 2.17%, (P) 0.025%, and highest tensile in 365.84 N/mm², the highest hardness in 220 (HB). When Gray Cast Iron is composed of (C) 2.84%, (Si) 1.46%, (P) 0.02%, and the Gray Cast Iron, the lowest hardness in 121 (HB), is Gray Cast Iron that is composed of (C) 3.47%, (Si) 3.79%, (P) 0.025% therefore, it can be concluded that the characteristic of the graphite with small, short and constantly spreading crystal will be the strongest one. On the contrary, that with big, long, inconstantly spreading one will be least strong.

1. บทนำ

เหล็กหล่อสีเทา เป็นเหล็กที่มีราคาถูก น้ำหนักจะมีความเหลวสูง สามารถไหลเข้าแม่พิมพ์ได้ดี จึงสามารถหล่อขึ้นรูปเป็นชิ้นงานที่ซับซ้อนได้ค่อนข้างง่าย ทางด้านสมบัติทางกล เหล็กหล่อสีเทาจะมีความแข็งแรงสูง (HB 67 – 450 ตามการวัดแบบบริเนล) จะมีความต้านทานแรงดึงต่ำ จากสมบัติดังกล่าว ทำให้เหล็กหล่อสีเทาเป็นเหล็กที่มีการผลิตและใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง

องค์ประกอบของเหล็กหล่อสีเทานั้นประกอบไปด้วยธาตุคาร์บอน (C) ระหว่าง 2.5 ถึง 4% (โดยน้ำหนัก), ซิลิกอน (Si), แมงกานีส (Mn), กำมะถัน (S) และอื่นๆ ธาตุสำคัญที่มีส่วนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาด และรูปร่างของเกรนไฟต์ในเหล็กหล่อสีเทานั้นคือ ธาตุซิลิกอน ดังนั้นในขั้นตอนของการผลิตเหล็กหล่อชนิดนี้จึงต้องมีการควบคุมปริมาณธาตุซิลิกอน เป็นพิเศษ เพราะขนาด และรูปร่างของเกรนไฟต์ ที่เกิดขึ้น ภายในเนื้อเหล็กหล่อสีเทานี้มีผลกระทบต่อสมบัติทางด้านความแข็งเป็นอย่างมาก

2. เหล็กหล่อสีเทา (Gray Cast Iron)

เหล็กหล่อสีเทาเป็นเหล็กหล่อที่มีส่วนผสม และโครงสร้างใกล้เคียงเหล็กดิบ (Pig Iron) ที่ถูกจากเตาสูง (Blast Furnace) ในบางโอกาสอาจผลิตเหล็กหล่อสีเทาจากเหล็กดิบได้โดยตรง โดยปราศจากการปรับปรุงส่วนผสมใดๆ หรือไม่ก็อาจนำเหล็กดิบมาหลอมใหม่ในเตาคิวโปลา (Cupola) หรือเตาไฟฟ้า แล้วปรับปรุงส่วนผสมบ้างเล็กน้อย เพื่อให้เหล็กมีคุณภาพดีขึ้น ส่วนการผลิตในเชิงอุตสาหกรรมแล้วจะนิยมผลิตด้วยเตาคิวโปลา นอกจากนี้เหล็กหล่อสีเทายังมีสมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพต่างๆ ที่เหมาะสำหรับใช้งานในอุตสาหกรรมหลายประการ ดังนี้

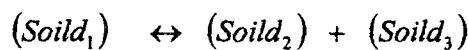
1. สามารถกลึงไส ตบแต่งให้ได้ขนาดตามต้องการ
2. มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ และมีความสามารถในการไหล (Fluidity) ดีสามารถหล่อหลอมให้ได้รูปร่างซับซ้อน
3. มีอัตราการขยายตัวน้อย สามารถใช้ทำส่วนประกอบของเครื่องจักรที่ต้องการรูปร่าง และขนาดที่แน่นอน
4. มีความต้านทานต่อแรงอัด และรับแรงสั่น (Damping Capacity) ได้ดี ใช้ทำแท่นรองรับอุปกรณ์เครื่องมือกลต่างๆ ได้ดี
5. สามารถที่จะปรับปรุงสมบัติความต้านทานแรงดึงได้มากขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ การปรับปรุงส่วนผสม และการอบชุบ ทำให้ใช้งานได้กว้างขวาง

การเรียกชื่อเหล็กหล่อสีเทา ก็เพราะว่าเหล็กหล่อชนิดนี้ เมื่อตีหักดูเนื้อเหล็กตรงรอยหักจะมีลักษณะเป็นสีเทาซึ่งต่างกับเหล็กหล่อสีขาว ในความเป็นจริงเหล็กหล่อสีเทาก็เป็นเหล็กหล่อที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสมอยู่ในช่วงใกล้เคียงกับเหล็กหล่อสีขาว ผิดตรงที่เหล็กหล่อสีเทาในขณะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็งจะเป็นระบบ

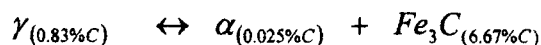
สเตเบิล (Stable) กล่าวคือปริมาณคาร์บอนส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของคาร์บอนบริสุทธิ์ แยกตัวออกมาเป็นแผ่น (Flakes) ซึ่งเรียกว่าแกรไฟต์ และกระจายอยู่ทั่วไปในเนื้อเหล็ก ทำให้มองดูรอยหักเป็นสีเทาหากทำการศึกษาแผนภาพสมดุลเหล็กคาร์ไบด์ จะพบว่าเป็นระบบสเตเบิล แต่การศึกษาจริงๆ นั้นจะไม่อาจศึกษาได้โดยตรงจากแผนภาพ เนื่องจากในทางปฏิบัติการเย็นตัวของเหล็กหล่อที่จะให้เป็นตามแผนภาพเป็นไปได้ยาก เพราะเหล็กจะต้องเย็นตัวช้ามาก ถึงแม้ว่าเหล็กจะถูกปล่อยให้เย็นตัวในแบบทราย อัตราการเย็นตัวก็ยังจัดว่าเร็วกว่าอัตราการเย็นตัวในสภาวะสมดุล (Equilibrium Cooling Rate) และอีกประการหนึ่งในเหล็กหล่อสีเทามีธาตุอื่น ๆ นอกเหนือจากคาร์บอนผสมอยู่ซึ่งมีสมบัติของเหล็กหล่ออยู่มาก การศึกษาสมบัติของเหล็กหล่อจึงต้องกระทำในลักษณะที่เน้นหนักไปทางด้านปฏิบัติมากกว่าทางด้านทฤษฎี

3. ปฏิกิริยายูเทคตอย (Eutectoid Reaction)

เกิดที่ Stress 0.83%C จะเป็นปฏิกิริยาหมกกับของความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างของแข็งและของเหลว



ในแผนภูมิสมดุลของเหล็กกับเหล็กคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้น คือ ออสเทนไนต์เท่ากับ 0.83%C เพอร์ไรต์เท่ากับ 0.025%C และซีเมนไทต์เท่ากับ 6.67%C ที่อุณหภูมิ 723 °C



4. การแข็งตัวของโลหะผสม

การแข็งตัวของโลหะผสมนั้นจะมีการแข็งตัวที่ซับซ้อน และแตกต่างไปจากโลหะบริสุทธิ์ ทั้งนี้ก็เพราะว่ามีการรวมตัวกันของธาตุตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ซึ่งการรวมตัวกันนี้จะทำให้เกิดผลึกต่าง ๆ มากมาย

หลังจากโลหะผสมที่เกิดจากการรวมกันของธาตุมากกว่า 1 ชนิด ถูกเทลงสู่แบบหล่อโลหะ ผลึกของโลหะผสมที่เกิดขึ้นจะแตกต่างจากผลึกของโลหะบริสุทธิ์ กล่าวคือ โลหะผสมที่ประกอบด้วยธาตุ A และธาตุ B เกิดการแข็งตัว ผลึกที่เกิดขึ้นจะไม่เป็นผลึกของธาตุ A และธาตุ B ที่แยกกันอยู่ แต่จะเป็นผลึกที่ประกอบไปด้วยธาตุ A และธาตุ B รวมกันอยู่ในลักษณะที่ธาตุ A ถูกละลายเข้าไปในธาตุ B หรือธาตุ B ถูกละลายในธาตุ A การรวมกันทั้งสองลักษณะนี้เรียกว่า สารละลายของแข็ง (Solid Solution) แต่ในบางครั้งอาจเกิดการรวมกันของธาตุ A และธาตุ B ซึ่งธาตุทั้งสองมีปริมาณใกล้เคียงกัน การรวมกันในลักษณะดังกล่าวนี้เรียกว่า สารประกอบของโลหะ (Intermetallic Compound) นอกจากสาร

ละลายของแข็ง และสารประกอบโลหะทั้ง 2 แล้ว ยังมีบางกรณีที่จะพบได้ไม่บ่อยนัก คือ กรณีที่ธาตุ A และธาตุ B หรือทั้ง A และ B จะปรากฏในสภาพผลึกบริสุทธิ์โดยไม่รวมตัวกัน

ดังนั้น จึงอาจจะสรุปได้ว่า โครงสร้างของโลหะผสมนั้นเกิดจากปฏิกิริยา 3 ลักษณะดังนี้คือ สารละลายของแข็ง สารประกอบโลหะ และโลหะบริสุทธิ์

5. เวลาของการแข็งตัว (Solidification Time)

อัตราการแข็งตัวของของแข็งจะขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัว หรืออัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างเหล็กหล่อและแบบหล่อ เวลาสำหรับเหล็กหล่อที่แข็งตัวอย่างสมบูรณ์ คำนวณได้จากการใช้กฎของ Chvorinov's Rule

$$t_s = K \left(\frac{V}{A} \right)^2$$

t_s คือ เวลาที่เหล็กหล่อแข็งตัวอย่างสมบูรณ์

V คือ ปริมาตรของเหล็กหล่อที่มีความร้อนเคลื่อนที่ก่อนเกิดการแข็งตัวขึ้น

A คือ พื้นที่ผิวของเหล็กหล่อที่เชื่อมต่อกับผิวของส่วนที่เย็นมาจากผิว ซึ่งความร้อนสามารถเคลื่อนตัวออกจากเหล็กหล่อได้

K คือ ค่าคงที่ของแม่พิมพ์จะขึ้นอยู่กับสมบัติ และอุณหภูมิเริ่มต้นของทั้งโลหะ และแม่พิมพ์

6. โครงสร้างที่เกิดจากการแข็งตัวของชิ้นงานหล่อ (Structure on Casting)

น้ำโลหะจากเตาหลอมเมื่อถูกเทลงสู่แบบหล่อ การแข็งตัวของน้ำโลหะก็จะเริ่มขึ้น โดยชิ้นงานหล่อนั้นจะเริ่มเย็นตัวจากบริเวณที่สัมผัสกับแบบหล่อ และเมื่อความร้อนจากน้ำโลหะถูกส่งถ่ายไปยังแบบหล่อน้ำโลหะที่ส่วนนั้นจะเย็นตัวลงจนถึงจุดแข็งตัว และเกิดผลึก (Chill Crystals) หรือที่เรียกโดยทั่วไปว่าเกรน ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 แบบคือ

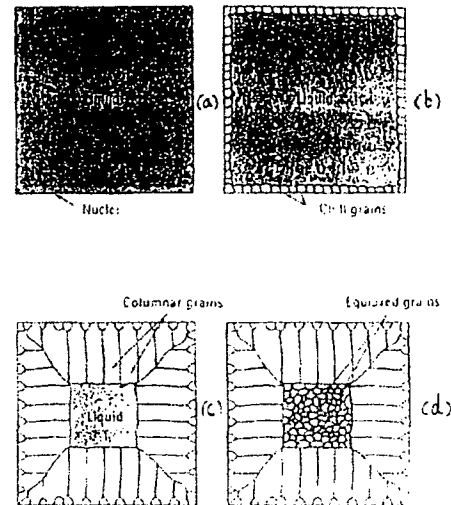
1. เกรนละเอียด (Fine Grain or Chill Zone) เป็นเกรนที่เกิดขึ้นบริเวณผนังของแบบหล่อซึ่งเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ได้เกรนขนาดเล็กบริเวณนี้จะมีค่าความแข็งแรงสูงกว่าบริเวณอื่น

2. เกรนยาว (Columnar Grain) เป็นบริเวณถัดจากผนังเข้ามาเล็กน้อย อุณหภูมิบริเวณนี้สูงกว่าที่ขอบ การถ่ายเทความร้อนเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ เกรนเติบโตในลักษณะเป็นแนวยาวเข้าหาจุดศูนย์กลางของแบบหล่อ

3. Equi - Axed Grain เป็นบริเวณใจกลางของแบบหล่อซึ่งเป็นส่วนสุดท้ายที่น้ำโลหะจะแข็งตัว โลหะมีอุณหภูมิสูง การถ่ายเท

ความร้อนทำได้ช้า เม็ดเกรนที่ได้หยาบ เกรนเติบโตได้ทุกทิศทาง

นอกจากนี้อุณหภูมิของน้ำโลหะที่เทลงในแบบหล่อ ยังมีผลต่อเม็ดเกรนด้วย ถ้าอุณหภูมิเทถูกต้อง เนื้อของโลหะจะเกิดเกรนทั้ง 3 ลักษณะ แต่ถ้าอุณหภูมิสูงมากไป ก็จะเกิดเฉพาะเกรนละเอียดและเกรนแบบยาวเท่านั้น



รูปที่ 1 แสดงพัฒนาการของโครงสร้างมหภาคในการแข็งตัวของโลหะ

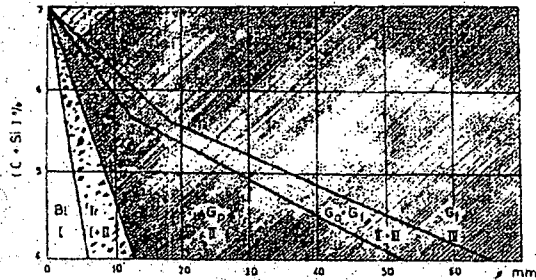
7. อัตราการเย็นตัวของเหล็กหล่อ (Cooling Rate)

จาก Equilibrium Diagram ของเหล็กกับคาร์บอน การเย็นตัวของเหล็กหล่อจะให้การเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิยูเทคติก เป็นออสเทนไนต์กับแฟรไฟต์ ดังนั้นปฏิกิริยาจะเกิดได้ต้องใช้เวลาานานมาก เพื่อให้อะตอมของคาร์บอนมีเวลาพอที่จะรวมกลุ่มกัน และมีการขยายตัวโดยอิสระ สำหรับเหล็กหล่อที่มีส่วนผสมอย่างแน่นอนชนิดหนึ่งนั้น ในขณะที่เย็นตัวจะเกิดแฟรไฟต์ยูเทคติกได้นั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ หลายประการ ดังนี้

1. อุณหภูมิของน้ำเหล็กตอนเทลงแบบ (Pouring Temperature)
2. ความร้อนแฝงของเหล็กหล่อ (Latent Heat of Solidification)
3. สภาพการนำความร้อนของตัวแบบหล่อ (Heat Conductivity of Mold)
4. ขนาดหรือปริมาณของน้ำเหล็กหล่อที่เทลงแบบ (Size of Casting)

ปัจจัยทั้งสี่ประการดังกล่าว จะเห็นว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของเหล็กหล่อกับความร้อนแฝง ขึ้นอยู่กับส่วนผสมของเหล็กหล่อโดยตรง แต่ตัวนำความร้อนของแบบหล่อ และขนาดของเหล็กหล่อเป็นปัจจัยที่เปลี่ยนแปลงได้กว้างขวาง ในการศึกษาเรื่องนี้ได้มีการสร้างแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้าง (Structure) ส่วนผสม

(Composition) และขนาดของเหล็กหล่อ (Size of Casting) ที่หล่อด้วยแบบทราย (Sand Mold) ไว้คือ



รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้าง (Structure) ส่วนผสม (Composition) และขนาดของเหล็กหล่อ (Size of Casting) ที่หล่อด้วยแบบทราย (Sand Mold)

โดยในแกนตั้ง แทนส่วนผสมเป็นผลรวมระหว่างเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนกับซิลิกอน (C + Si) % แกนนอน แทนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเป็นมิลลิเมตร (mm.) แผนภาพจะแสดงลักษณะของโครงสร้างแบ่งเป็นโซนต่าง ๆ เช่น

โซน I แสดงถึงโครงสร้าง เหล็กหล่อขาว (Ledeburite + Pearlite)

โซน I + II แสดงถึงโครงสร้าง เหล็กหล่อ Mottled (Ledeburite + Pearlite + Graphite)

โซน II แสดงถึงโครงสร้าง เหล็กหล่อสีเทาประเภท Pearlitic Cast iron

โซน II + III แสดงถึงโครงสร้าง เหล็กหล่อสีเทาประเภท Ferrite Pearlitic

โซน III แสดงถึงโครงสร้าง เหล็กหล่อสีเทาประเภท Ferritic

จากแผนภาพจะได้ว่า ถ้าเหล็กหล้อมีคาร์บอน 3% และซิลิกอน 2% ซึ่งปกติเหล็กหล่อประเภทนี้เป็นเหล็กหล่อสีเทาประเภท เพอร์ลิติก แต่ถ้าเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กหล่อเล็กกว่า 10 mm. โครงสร้างอาจจะ เป็นมอดเติล หรือเหล็กหล่อขาวก็ได้

8. โครงสร้างของเหล็กหล่อสีเทา

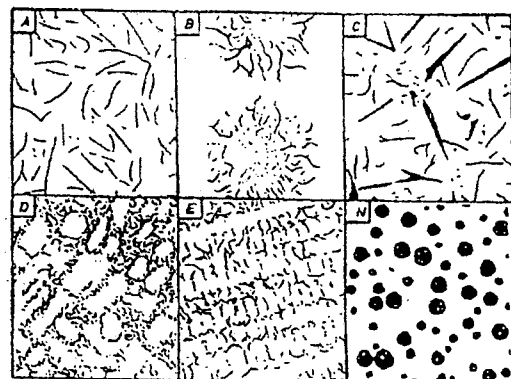
เพื่อให้เหล็กหล่อสีเทาที่ผลิตมีคุณภาพสูง จำเป็นจะต้องควบคุมส่วนผสมของเหล็กซึ่งจะเกี่ยวข้องไปถึงโครงสร้างพื้นฐาน และลักษณะของแกรไฟต์ที่เกิดขึ้น เพื่อความเข้าใจจะขอกล่าวถึงลักษณะของโครงสร้างพื้นฐาน และลักษณะของแกรไฟต์ดังนี้

โครงสร้างพื้นฐาน (Matrix) ของเหล็กหล่อสีเทามีสามประเภท คือ เพอร์ลิติก, เพอร์ลิติก-ดิค และเพอร์ไรต์เพอร์ลิติก โดยหลักทางโลหะ

วิทยาจะถือว่าโครงสร้างเพอร์ลิติกเป็นโครงสร้างที่ให้คุณสมบัติทนแรงดึงได้สูงที่สุด ส่วนเพอร์ไรต์-เพอร์ลิติก และเพอร์ลิติก ก็จะให้คุณสมบัติทนแรงดึงลดทอนลงไปตามปริมาณของเพอร์ไรต์เพราะฉะนั้นถ้าจะให้เหล็กหล่อคุณภาพดีจะต้องควบคุมส่วนผสม โดยเฉพาะปริมาณของคาร์บอนและซิลิกอน ซึ่งจะสัมพันธ์กับความหนาหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน

แกรไฟต์เป็นผลึกที่นุ่ม และเปราะของคาร์บอน มีความแข็งบริเนล (Brinell Hardness) ประมาณ 1 HB มีความเค้นแรงดึงประมาณ 2 kg/mm^2 หรือประมาณ 20 Pa และความหนาแน่นประมาณ 2.2 kg/cm^3 สำหรับโครงสร้างของเหล็กหล่อที่ใช้กันส่วนมาก 85% ของคาร์บอนทั้งหมดจะอยู่ในสภาพแกรไฟต์ โครงสร้างละเอียดของแกรไฟต์ยังแยกออกได้ตามรูปร่าง และขนาด เช่น เล็กหรือใหญ่ เกือบหรือมีแฉกอยู่โดยรอบ (Asteroidal) เป็นก้อน ๆ หรือกลม (Spheroidal) สภาพของชิ้นแกรไฟต์มีผลเป็นอย่างมากต่อสมบัติทางกลของเหล็กหล่อ ตัวอย่างเช่นเหล็กหล่อสีเทาซึ่งมีคาร์บอนอยู่ 3.6% และมีซิลิกอนอยู่ 2.1% มีแกรไฟต์ในรูปเกล็ดมีความเค้นแรงดึง 18 kg/mm^2 หรือประมาณ 180 Pa เทียบกับเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมที่มีปริมาณคาร์บอนและซิลิกอนเท่ากัน แต่มีแกรไฟต์เป็นรูปกลม ปรากฏว่าเหล็กหล่อชนิดหลังนี้มีความเค้นแรงดึงถึง 55 - 70 kg/mm^2 หรือประมาณ 550 - 700 Pa ความแตกต่างนี้เนื่องมาจากรูปร่างของชิ้นแกรไฟต์ต่างกัน แกรไฟต์ในรูปเกล็ดทำให้เกิดการเพิ่มความเค้น (Stress Concentration) ที่ตรงปลายแหลมของเกล็ดถ้ามีแรงกระทำในทิศทางตั้งฉากกับความยาวของเกล็ด สำหรับแกรไฟต์รูปกลมนั้นจะมีความเพิ่มความเค้นน้อยกว่ามาก

ลักษณะของแกรไฟต์ โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 6 ชนิด ขึ้นอยู่กับขนาด และรูปร่างดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงชนิดของแกรไฟต์

ประเภท A เป็นลักษณะของแกรไฟต์เฟลกขนาดเล็ก และกระจัดกระจายอย่างสม่ำเสมอ มีลักษณะเป็นยูคleticแกรไฟต์ จากภาพจะเห็นแกรไฟต์เป็นเส้น แต่ความจริงแล้วจะเป็นแผ่นมีลักษณะโค้งไปมา ทั้งนี้เป็นเพราะในขณะที่เกิดเมื่อเริ่มครั้งแรกเป็นนิวเคลียสจะลอยอยู่ในเหล็ก

หลอมเหลว การขยายตัวในคอนแรกจะอิสระ และจะมีทิศทางไปตามแกน C ตามระบบผลึก Hexagonal ซึ่งเป็นทิศทางที่เหมาะสมในการขยายตัว (Preferential Direction) พอยขยายตัวได้ระยะหนึ่งจะเข้าใกล้ผลึกของแกรไฟต์อื่น ๆ ที่เกิดพร้อม ๆ กัน ทำให้เกิดการแย่งอะตอมของคาร์บอนซึ่งกันและกัน เมื่อเป็นเช่นนี้แกรไฟต์แต่ละตัวจะพยายามเปลี่ยนทิศทางไปยังบริเวณที่ยังมีอะตอมคาร์บอนมากกว่า เพื่อการขยายตัวทำให้แผ่นของแกรไฟต์เกิดลักษณะโค้ง โอกาสที่แกรไฟต์จะชนกันดูจะยาก

ประเภท B เป็นลักษณะของแกรไฟต์ผลึกขนาดเล็กเช่นเดียวกับประเภท A แต่การเกิดจะอยู่เป็นกลุ่ม ๆ โดยผลึกแกรไฟต์แต่ละตัวจะพุ่งไปรวมกันตรงกลาง คล้ายกลีบดอกไม้ (Rosette) จัดเป็นยูเทคติกแกรไฟต์เช่นเดียวกัน แต่การกระจายกระจายไม่สม่ำเสมอมักจะพบแกรไฟต์ประเภทนี้ตรงบริเวณใจกลางของชิ้นงานหล่อที่บาง หรือเหล็กหล่อที่ทำให้ผิวเย็นเร็ว (Chilled Cast Iron) ซึ่งเป็นลักษณะของเหล็กที่เรียกว่า มอดคิลคือมีทั้งโครงสร้างที่เป็นเหล็กหล่อสีเทา และเหล็กหล่อสีขาว

ประเภท C เป็นลักษณะของแกรไฟต์ที่มีทั้งขนาดใหญ่ (Primary or Kish Graphite) และขนาดเล็ก (Eutectic) เกิดสลับกันเป็นลักษณะของแกรไฟต์ที่เกิดในเหล็กหล่อที่มีคาร์บอน และซิลิกอนสูง คือค่า Carbon Equivalent เกินกว่า 4.3% คือเป็นเหล็กส่วนผสมไฮเปอร์ยูเทคติก อัตราการเย็นตัวของเหล็กหล่ออยู่ในเกณฑ์ช้าลักษณะเช่นนี้จะทำให้เหล็กมีความต้านทานแรงดึงต่ำ แต่เหล็กจะอ่อนนุ่ม กลึงไสได้ง่าย

ประเภท D และ ประเภท E พบลักษณะของแกรไฟต์ลักษณะนี้ในเหล็กที่มีอัตราการเย็นตัวสูง และเกิดกับเหล็กหล่อที่มีส่วนผสมเป็นไฮโปยูเทคติก คือ มีค่า C.E. ต่ำ ลักษณะของแกรไฟต์จะเป็นกลีบเล็ก ๆ แบบเดียวกับแกรไฟต์ยูเทคติก แต่การเกิดจะอยู่ตามขอบเกรน ลักษณะที่ต่างกันของแกรไฟต์ประเภท D และ E ก็คือ ถ้าเป็นประเภท D จะเกิดในลักษณะที่ไม่มีทิศทาง (Random) แต่ประเภท E จะเกิดลักษณะมีทิศทาง (Orientation) แต่ทั้งสองประเภทจะเกิดตามขอบของเกรน (Inrer dendritic) ถ้าปล่อยให้เหล็กเย็นช้าลงจะไม่เกิดแกรไฟต์ลักษณะนี้ ลักษณะของแกรไฟต์ประเภท D และ E เป็นลักษณะที่ไม่ควรจะให้เกิดในเหล็กหล่อเพราะจะทำให้เหล็กเปราะ และแตกหักได้ง่าย

ประเภท N เป็นลักษณะของแกรไฟต์อยู่ในรูปกลม จะเกิดได้เฉพาะในเหล็กหล่อที่มีการรวมวิธีการผลิตแตกต่างไปจากเหล็กหล่อสีเทาทันที ๆ ไป ซึ่งก็คือเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม ลักษณะของแกรไฟต์กลมนี้จะมีผลต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อมาก โดยเฉพาะทางด้านความเหนียว และความต้านทานแรงดึงทำให้เหล็กหล่อแกรไฟต์กลมมีชื่อเรียกว่า Semi Steel

ข้อสรุปที่พอจะเป็นแนวทางเพื่อผลิตเหล็กหล่อให้ได้คุณภาพสูงก็คือ จะต้องควบคุมส่วนผสมของเหล็กหล่อร่วมกับความหนาให้ได้โครงสร้างพื้นฐานเป็นเฟอร์ไรต์ และจะต้องทำการอินนอคูลูเทเพื่อ

ได้แกรไฟต์เป็นประเภท A และเป็นขนาดเล็กเท่าที่จะทำได้

9. ส่วนผสมของเหล็กหล่อ (Chemical Composition of The Iron)

จากที่เราทราบมาแล้วเหล็กหล่อสีเทาเป็นเหล็กที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสมทั่ว ๆ ไป จะมีคาร์บอนระหว่าง 2.5 ถึง 4% ซึ่งคาร์บอนนี้จะตกผลึกเกิดเป็นแกรไฟต์แทรกอยู่ในเนื้อเหล็ก ขณะที่เหล็กหล่อเย็นตัวลงจากสภาพหลอมเหลวจนแข็งตัว นอกจากธาตุคาร์บอนแล้ว ยังมีธาตุอื่น ๆ เช่น ซิลิกอน, ฟอสฟอรัส และอื่น ๆ ซึ่งธาตุต่าง ๆ นี้มีบทบาทสำคัญมากเกี่ยวกับสมบัติของเหล็กหล่อเราแบ่งธาตุต่าง ๆ นอกเหนือไปจากคาร์บอนออกเป็น 2 ชนิด คือ

9.1 ประเภทช่วยให้เกิดแกรไฟต์ (Graphite-Forming Elements) ได้แก่ ซิลิกอน, ฟอสฟอรัส, อลูมิเนียม, นิกเกิล, ทองแดง และอื่น ๆ ธาตุที่มีอิทธิพลในการช่วยให้เกิดแกรไฟต์มากที่สุดก็คือ ซิลิกอน ถัดไปก็เป็นฟอสฟอรัส และอลูมิเนียมตามลำดับ เหตุผลที่จะพอสรุปถึงอิทธิพลของธาตุต่าง ๆ เหล่านี้ได้มีดังนี้ ปกติธาตุคาร์บอนกับเหล็กสามารถรวมกันให้ซีเมนไทต์ (Fe_3C) แต่ถ้ามียังซิลิกอนอยู่ด้วยแล้วจะปรากฏว่าธาตุซิลิกอนมีความดึงดูด (Affinly) ระหว่างเหล็กสูงกว่าคาร์บอน ดังนั้นซิลิกอนจะรวมกับเหล็กก่อน และให้สารประกอบในขณะที่เหล็กยังอยู่ที่อุณหภูมิสูง หรืออยู่ในสภาพหลอมเหลว ดังนั้นธาตุคาร์บอนจึงหมดโอกาสที่จะรวมกับเหล็กเกิด ซีเมนไทต์ เมื่อเป็นเช่นนี้ อะตอมของธาตุคาร์บอนจึงจับรวมกันเข้าเป็นกลุ่มเป็นก้อนรวมกันเป็นแกรไฟต์ ซึ่งรูปแบบของแกรไฟต์ปกติจะเกิดเป็นแผ่นบาง ๆ แต่จะมีการเปลี่ยนลักษณะไปบ้างขึ้นอยู่กับปัจจัยในการหล่อ

9.2 ประเภทรวมตัวกับคาร์บอน (Carbide-Forming Elements) ได้แก่ธาตุ แมงกานีส, โครเมียม, ทังสเตน, วานาเดียม, โมลิบดีนัม และอื่น ๆ ธาตุเหล่านี้จะไม่รวมกับเหล็ก เพื่อให้คาร์บอนแยกตัวไปรวมกันเกิดแกรไฟต์ แต่ธาตุเหล่านี้จะรวมตัวกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์ และเป็นคาร์ไบด์ที่มีเสถียรภาพเมื่อเป็นเช่นนี้ ถ้าในเหล็กหล่อมีธาตุเหล่านี้อยู่ เหล็กหล่อจะมีโอกาสเป็นเหล็กหล่อสีเทาได้ยาก โดยทั่วไปในเหล็กหล่อสีเทามักจะผสมแมงกานีสลงประมาณ 0.5% ถึง 0.8% ด้วยเหตุผลที่จะให้แมงกานีสไปดึงเอากำมะถันออกจากเหล็ก เพราะในเหล็กหล่อถ้ามีกำมะถันมาก กำมะถันจะไปรวมกับเหล็กกลายเป็นเหล็กซัลไฟด์ (FeS) ซึ่งจะทำให้เหล็กเสียสมบัติที่ดีไป กล่าวคือกำมะถันทำให้เหล็กเปราะที่อุณหภูมิสูง แมงกานีสนอกจากช่วยดึงกำมะถันแล้วแมงกานีสยังช่วยให้เกิดเฟอร์ไรต์ที่ละเอียด

10. บทบาทของธาตุผสมในเหล็กหล่อสีเทา

10.1 แมงกานีส (Manganese) จัดเป็นธาตุที่มีบทบาททางด้านเพิ่มเสถียรภาพให้กับออสเทนไนต์ และเป็นธาตุรวมกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์ แมงกานีสเป็นธาตุที่ใช้สำหรับลดกำมะถันในเหล็กหล่อ โดยจะใช้ประมาณ 1.7 เท่าของกำมะถัน และบวกอีก 0.3% ซึ่งเมื่อรวมกับกำมะถัน

แล้ว จะได้แมงกานีสจัดไฟด์ และจะลอยขึ้นสู่ผิวรวมตัวกับเหล็ก เพราะแมงกานีสจัดไฟด์ มีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าเหล็กหลอมเหลว ในกรณีผสมแมงกานีสมากเกินไปจนจะไปดึงกำมะถัน แมงกานีสมีบทบาทช่วยให้เกิดเฟรไรต์และเพิ่มความแข็ง เพราะแมงกานีสมีแนวโน้มทำให้เกิดคาร์ไบด์ (Free Carbide) ทำให้เหล็กเปราะแตกง่าย

10.2 ฟอสฟอรัส (Phosphorus) จัดเป็นธาตุที่มีอยู่ในเหล็กหล่อทั่ว ๆ ไป ธาตุหนึ่ง (Common Element) ซึ่งไม่จัดเป็นธาตุผสม ความจริงฟอสฟอรัสเป็นธาตุอยู่ในกลุ่มช่วยให้เกิดแกรไฟต์แล้วจะทำให้เกิด Ternary Eutectic ระหว่างออสเทนไนท์ Fe_3C และ Fe_3P ซึ่งจะเกิดอยู่ตามขอบเกรน เมื่อเหล็กเย็นตัวทำให้เหล็กมีความแข็งและเปราะ มีค่าความเค้นแรงดึงต่ำ จะใช้ประโยชน์ได้ในขอบเขตจำกัด เช่น ใช้ทำเบรค (Brake shoes) ของรถไฟ ฟอสฟอรัส เป็นธาตุที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการไหล (Fluidity) ให้กับเหล็กหล่อมาก ดังเช่นในเหล็กส่วนผสมไฮเปอร์ยูเทคติก (Hyper Eutectic) ถ้าเพิ่มฟอสฟอรัสประมาณ 0.2% จะทำให้เหล็กหล่อหลอมเหลวมีความสามารถในการไหลเพิ่มขึ้น เท่ากับเหล็กหล่อที่หลอมละลายที่อุณหภูมิสูงขึ้นไปประมาณ $15^{\circ}C$ หรือเท่ากับเพิ่มปริมาณคาร์บอนขึ้น 0.1% คุณสมบัติที่ ฟอสฟอรัส มีส่วนเพิ่มอีกประการหนึ่งก็คือ เพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และตัวนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) เมื่อผสมร่วมกับ ซิลิกอน

10.3 ซิลิกอน (Silicon) เป็นธาตุที่มีอยู่ในเหล็กหล่อสีเทาทั่ว ๆ ไป ธาตุหนึ่ง (Common Element) ซึ่งไม่จัดเป็นธาตุผสม ถ้ามีอยู่ในเหล็กไม่เกิน 3% และจะผสมซิลิกอนเกิน 3% เฉพาะในกรณีที่ต้องการสมบัติพิเศษ โดยเฉพาะใช้งานที่อุณหภูมิสูง ซิลิกอนเป็นธาตุที่จัดอยู่ในกลุ่มช่วยให้เกิดแกรไฟต์ อันดับแรกในเหล็กหล่อสีเทาจะต้องมีซิลิกอน การศึกษาสมบัติของเหล็กหล่อสีเทา จะพิจารณาพร้อมกับคาร์บอน ซึ่งจะเปลี่ยนโครงสร้างขึ้นอยู่กับปริมาณของ Si กับ C และอัตราการเย็นตัวในแบบหล่อ (ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุทำแบบหล่อขนาดความหนาของงานหล่อ) ถ้าผสม ซิลิกอนในเหล็กสูงกว่า 3% ในกรณีต้องการสมบัติทนความร้อนของเหล็กหล่อ เช่นผสมซิลิกอน 5 ถึง 7% (Matrix เป็น Ferritic) จะทนความร้อนได้สูงถึง $750^{\circ}C$ ในกรณีแกรไฟต์มีลักษณะเป็นเกล็ด (Flake) และจะทนได้สูงถึง $850^{\circ}C$ เมื่อแกรไฟต์เป็นรูปกลม (Nodule) ซึ่งเรารู้จักเหล็กหล่อชนิดนี้ในนามของซิลาล (Sial) และถ้าผสมนิกเกิล ประมาณ 18% โครเมียมประมาณ 2 – 5% ซึ่งจะได้โครงสร้างพื้นฐานเป็นออสเทนไนท์ จะทนความร้อนได้สูงถึง $1000^{\circ}C$ ซึ่งเรารู้จักเหล็กหล่อชนิดนี้ในนามนิโคร-ซิลาล (Nicro-Sial)

10.4 ซัลเฟอร์ เป็นธาตุที่ลดการละลายของคาร์บอนในน้ำเหล็ก ดังนั้นถ้าจะถือว่าซัลเฟอร์ช่วยให้เกิดแกรไฟต์ แต่ตามความเป็นจริงเมื่อเพิ่มฟอสฟอรัสแกรไฟต์จะลด และมักจะทำให้เหล็กหล่อเป็นเหล็กหล่อสีขาว โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีแมงกานีสอยู่บ้าง ซัลเฟอร์จะรวมกับเหล็กเกิดเป็นไอเอ็นซัลไฟด์ และช่วยให้เกิดเหล็กหล่อสีขาว ในกรณีเช่นนี้จะเกิดมีจุดแข็งเป็นพิเศษ (Hard Spots)

10.5 สารอื่นๆ นอกเหนือจากสารที่กล่าวมาแล้ว สารที่ช่วยให้เกิดแกรไฟต์ คือ ทองแดง นิกเกิล อลูมิเนียม และสารที่กันไม่เกิดแกรไฟต์ คือ โครเมียม โมลิบดีนัม ฯลฯ

11.อิทธิพลของธาตุผสมในเหล็กหล่อ (Effects of Alloy Addition in Cast Iron)

การผสมธาตุต่างๆ ลงไปในเหล็กหล่อส่วนใหญ่เพื่อวัตถุประสงค์ในการเพิ่มสมบัติทางด้านความต้านทานการสึกหรอ ความต้านทานการกัดกร่อน และความต้านทานการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูงให้กับเหล็กหล่อสำหรับสมบัติทางด้านความเค้นแรงดึงนั้น เหล็กหล่อสีเทาสามารถเพิ่มได้จนถึงประมาณ $304 N/mm^2$ โดยเหล็กยังมีสมบัติทางด้านความสามารถในการกลึง-ไสดี สามารถกระทำได้โดยการ Inoculated ด้วยเฟอร์โรซิลิกอน หรือแคลเซียมซิลิไฟด์กับเหล็กที่มีค่า Carbon Equivalent (C.E.)ต่ำ การทำอินออกลูชันจะสามารถให้ค่าความเค้นแรงดึงสูง โดยไม่ต้องอาศัยธาตุผสม (Alloy Elements) เพราะการใช้ธาตุผสมจะทำให้เหล็กมีราคาแพง และธาตุผสมบางธาตุ โดยเฉพาะนิกเกิลและโมลิบดีนัม มีราคาแพง

ค่า Carbon Equivalent หรือ C.E. เป็นการหาปริมาณคาร์บอนโดยบวกเพิ่มอิทธิพลของธาตุอื่น ๆ เข้าไปด้วย โดยค่าที่ได้จะเป็นเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนที่จะมีอยู่จริง ในทางทฤษฎีการคำนวณค่า C.E. จะมีสมการการคำนวณ ดังนี้

$$C.E. = C + 0.31 Si + 0.27 P + 0.078 (1.85 - Mn\%) + 0.156 Al \\ 0.125 Ti + 0.109 Ni + 0.0935 Cu - 0.935 Mo - 0.312 Cr - \\ 0.624 V$$

ส่วนในทางปฏิบัตินั้น จะถือว่ามีเพียงซิลิกอน และฟอสฟอรัสเท่านั้นที่มีอิทธิพลต่อปริมาณของคาร์บอน โดยเฉพาะในเหล็กหล่อสีเทา จึงใช้สมการคำนวณดังนี้

$$C.E. = C + \frac{(Si + P)}{3}$$

การผสมธาตุต่างๆ ถ้าต้องการผสมเพียงจำนวนเล็กน้อยจะผสมในเบ้าหลอม (Ladle) และธาตุผสมส่วนมากจะอยู่ในรูปของเฟอร์โร-อัลลอยด์ ถ้าต้องการผสมปริมาณสูงจะต้องใส่ในเตาหลอม ซึ่งจะมีการสูญเสียจำนวนมาก ดังนั้นการหลอมเหล็กหล่อที่ต้องผสมธาตุบางตัว ปริมาณสูงจะกระทำโดยเตาหลอมไฟฟ้า (Induction) ในบางกรณีอาจต้องทำการหลอม เฟอร์โร-อัลลอยด์ แล้วนำมาผสมกับเหล็กหลอมเหลวเพื่อลดการสูญเสีย หรือบางครั้งอาจต้องใช้วัตถุดิบที่มีปริมาณของ

ธาตุที่ต้องการอยู่ในเกณฑ์สูงมาทำการหลอมแล้วจึงเติมธาตุผสมลงไปอีกเล็กน้อยในภายหลัง

12. ขั้นตอนดำเนินการหล่อขึ้นทดสอบ

จากการศึกษาข้างต้นจะพบว่า ธาตุประกอบที่สำคัญที่ส่งผลต่อโครงสร้างของเหล็กหล่อสีเทา คือ ซิลิกอน (Si) ในการทดลองจึงให้ความสำคัญต่อธาตุ ซิลิกอน ซึ่งมีลำดับการทดลองดังนี้

12.1 คำนวณส่วนผสมในการหล่อขึ้นทดสอบ โดยอาศัยมาตรฐาน JIS

12.2 กำหนดให้ธาตุประกอบเริ่มต้นในการหล่อ ประกอบด้วย คาร์บอน (C) 3.1% ซิลิกอน (Si) 1.3% แมกนีสิ (Mn) 0.7% ฟอสฟอรัส (P) 0.025% ซัลเฟอร์ (S) 0.1% อุณหภูมิในการเทหล่อ 1400 °C

12.3 ขนาดขึ้นทดสอบ Ø 30 mm. ยาว 500 mm. ปริมาตร (V) $35.34 \times 10^4 \text{ mm}^3$ พื้นที่ผิว (A) $48.53 \times 10^3 \text{ mm}^2$ ใช้ทรายทำแบบหล่อ มีค่าคงที่ ณ 1400 °C (K) 0.75 mm^2 สามารถประมาณเวลาการเย็นตัว โดยอาศัยกฎของ Chvorinov's Rule

$$t_s = 0.75 \times \left(\frac{35.34 \times 10^4}{48.53 \times 10^3} \right)^2$$

$$= 53.028 \text{ s}$$

12.4 ดำเนินการหล่อขึ้นทดสอบ 2 ครั้งครั้งละ 6 ชิ้นโดยเพิ่มอัตราส่วนผสมของ ธาตุซิลิกอน (Si) ขึ้นละ 0.15 % ในการหล่อครั้งแรก และขึ้นละ 0.5 % ในการหล่อครั้งที่ 2

12.5 ทำการทดสอบขึ้นทดสอบดังนี้

12.5.1 ตรวจสอบหาอัตราส่วนธาตุประกอบ

12.5.2 ทดสอบความต้านทานแรงดึง

12.5.3 ทดสอบความแข็งบริเนล

12.5.4 ตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาค

12.6 คำนวณหาอัตราส่วนปริมาณโครงสร้างของโคไซด์ ปฏิกริยาเตคติก (Eutectic Reaction) ที่อุณหภูมิห้อง (25°C) ซึ่งมี ซิเมนไทต์ เท่ากับ 6.67%C ปริมาณคาร์บอนเมื่อเหล็กมีโครงสร้างเป็น เฟอร์ไรต์ทั้งหมด เท่ากับ 0.008% ดังตัวอย่างต่อไปนี้

$$\text{ปริมาณสภาพของเฟอร์ไรต์} = \frac{6.67 - 2.84}{6.67 - 0.008} \times 100$$

$$= 57.49 \%$$

$$\text{ปริมาณแกรไฟต์} = 100 - 57.49$$

$$= 42.51 \%$$

โครงสร้างของเหล็กหล่อสีเทาที่มี ปริมาณคาร์บอน (C) 2.84 % จะประกอบไปด้วย เฟอร์ไรต์ 57.49% + แกรไฟต์ 42.509%

13. ผลการทดสอบ

จากการทดสอบได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 1 และ 2 โดยที่ ตารางที่ 1 แสดงผลการทดลองในการหล่อครั้งที่ 1 และในตารางที่ 2 แสดงผลการทดลองในการหล่อครั้งที่ 2

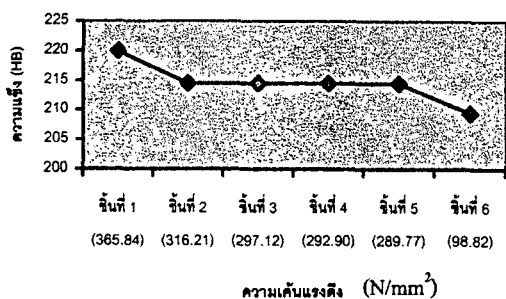
ส่วนในรูปที่ 6 จะแสดงลักษณะของโครงสร้างของขึ้นทดสอบในการหล่อครั้งที่ 1 และในรูปที่ 7 จะแสดงลักษณะของโครงสร้างของขึ้นทดสอบในการหล่อครั้งที่ 2

ตารางที่ 1. แสดงผลการทดลองในการหล่อครั้งที่ 1

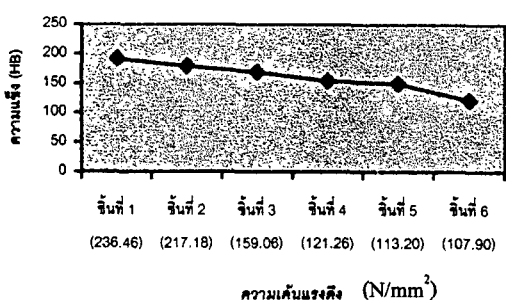
ชิ้น ที่	อัตราส่วนผสม (%)			C.E.	การทดสอบ	
	C	Si	P		ความเค้นแรงดึง (N/mm ²)	ความแข็ง บริเนล (HB)
1.	2.84	1.46	0.02	3.33	365.84	220.0
2.	2.80	1.61	0.02	3.34	316.21	214.5
3.	2.80	1.80	0.02	3.40	297.12	214.5
4.	2.72	1.95	0.02	3.37	292.90	214.5
5.	2.72	2.11	0.02	3.43	289.77	214.5
6.	2.61	2.17	0.02	3.34	98.82	209.5

ตารางที่ 2. แสดงผลการทดลองในการหล่อครั้งที่ 2

ชิ้น ที่	อัตราส่วนผสม (%)			C.E.	การทดสอบ	
	C	Si	P		ความเค้นแรงดึง (N/mm ²)	ความแข็ง บริเนล (HB)
1.	3.32	1.08	0.02	3.68	236.46	192.0
2.	3.38	1.61	0.02	3.92	217.18	179.0
3.	3.47	2.16	0.02	4.19	159.06	168.5
4.	3.49	2.68	0.02	4.39	121.26	154.0
5.	3.46	3.24	0.02	4.54	113.20	149.5
6.	3.47	3.79	0.02	4.74	107.90	121.0



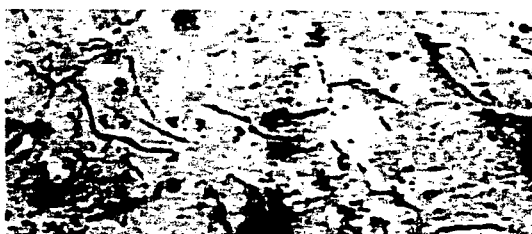
รูปที่ 4 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าความเค้นแรงดึง และ ความแข็ง ในการหล่อครั้งที่ 1



รูปที่ 5 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าความเค้นแรงดึง และ ความแข็ง ในการหล่อครั้งที่ 2



ชั้นที่ 1. ส่วนผสม C 2.84% Si 1.46 % P 0.025 % (C.E. 3.33)
โครงสร้าง เฟิร์ลโลด์ 57.49 % + แกรไฟต์ 42.51 % (Type A)



ชั้นที่ 2. ส่วนผสม C 2.80% Si 1.61 % P 0.024 % (C.E. 3.34)
โครงสร้าง เฟิร์ลโลด์ 58.09 % + แกรไฟต์ 41.91 % (Type A)



ชั้นที่ 3. ส่วนผสม C 2.80% Si 1.80 % P 0.025 % (C.E. 3.40)
โครงสร้าง เฟิร์ลโลด์ 58.09 % + แกรไฟต์ 41.91 % (Type A)



ชั้นที่ 4. ส่วนผสม C 2.72% Si 1.95 % P 0.025 % (C.E. 3.37)
โครงสร้าง เฟิร์ลโลด์ 59.29 % + แกรไฟต์ 40.71 % (Type A)



ชั้นที่ 5. ส่วนผสม C 2.72% Si 2.11 % P 0.025 % (C.E. 3.43)
โครงสร้าง เฟิร์ลโลด์ 59.29 % + แกรไฟต์ 40.71 % (Type A)

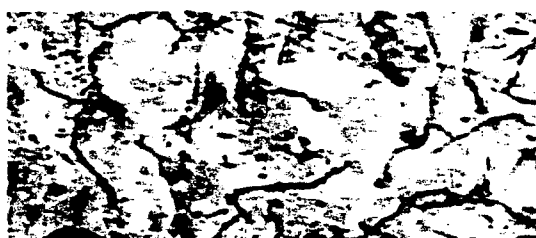


ชั้นที่ 6. ส่วนผสม C 2.61% Si 2.17 % P 0.025 % (C.E. 3.34)
โครงสร้าง เฟิร์ลโลด์ 60.94 % + แกรไฟต์ 39.06 % (Type A)

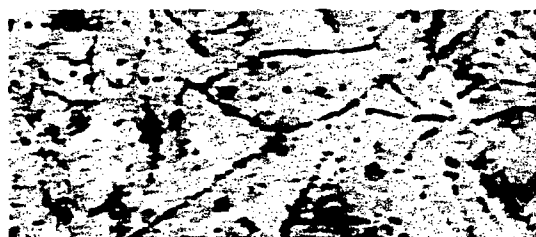
รูปที่ 6 แสดงลักษณะโครงสร้างของชั้นทดสอบในการหล่อครั้งที่ 1



ชั้นที่ 1. ส่วนผสม C 3.32% Si 1.80 % P 0.022 % (C.E. 3.68)
โครงสร้าง เฟอไรต์ 50.28 % + แกรไฟต์ 40.72 % (Type A)



ชั้นที่ 2. ส่วนผสม C 3.38% Si 1.61 % P 0.023 % (C.E. 3.92)
โครงสร้าง เฟอไรต์ 40.38 % + แกรไฟต์ 50.62 % (Type A)



ชั้นที่ 3. ส่วนผสม C 3.47% Si 2.16 % P 0.023 % (C.E. 4.19)
โครงสร้าง เฟอไรต์ 50.28 % + แกรไฟต์ 40.72 % (Type A)



ชั้นที่ 4. ส่วนผสม C 3.49% Si 2.68 % P 0.033 % (C.E. 4.39)
โครงสร้าง เฟอไรต์ 47.73 % + แกรไฟต์ 52.27 % (Type C)



ชั้นที่ 5. ส่วนผสม C 3.46% Si 3.24 % P 0.024 % (C.E. 4.54)
โครงสร้าง เฟอไรต์ 48.18 % + แกรไฟต์ 51.82 % (Type C)



ชั้นที่ 6. ส่วนผสม C 3.47% Si 3.79 % P 0.033 % (C.E. 4.74)
โครงสร้าง เฟอไรต์ 48.03 % + แกรไฟต์ 51.97 % (Type C)

รูปที่ 7 แสดงลักษณะโครงสร้างของชั้นทดสอบในการหล่อครั้งที่ 2

14.สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่า

14.1 ลักษณะโครงสร้างของผลึกแกรไฟต์ (แกรน) ในเนื้อเหล็กหล่อสีเทาตั้งแต่รูปที่ 6 ถึง รูปที่ 7 จะแปรเปลี่ยนไปตามปริมาณของธาตุซิลิกอน (Si) ที่เติมลงในขบวนการหล่อ โดยมีผลให้เมื่อเพิ่มปริมาณของธาตุซิลิกอน ขนาดของผลึกแกรไฟต์ ใหญ่ขึ้นหรือยาวขึ้น แต่ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุคาร์บอน (C) ด้วย เนื่องจากว่าธาตุซิลิกอน จะรวมตัวกับเหล็ก ทำให้ธาตุคาร์บอน ไม่มีโอกาสที่จะรวมตัวกับเหล็กเกิดเป็นซีเมนไทต์ (Fe_3C) ได้ ดังนั้นธาตุคาร์บอนจะไปรวมตัวกันเกิดเป็นแกรไฟต์แทน ทำให้ขนาดและความยาวของผลึกแกรไฟต์ ใหญ่หรือยาวขึ้น ในทางตรงข้าม ถ้าหากเติมธาตุซิลิกอน ในปริมาณมาก แต่ปริมาณของธาตุคาร์บอน มีน้อย ลักษณะโครงสร้างของผลึกแกรไฟต์ ก็อาจจะเล็กลงได้

14.2 ชิ้นงานที่เย็นตัวแล้วเมื่อนำไปทำการทดสอบสมบัติทางกลพบว่า ในด้านความแข็งที่ลักษณะโครงสร้างที่ผลึกแกรไฟต์ มีลักษณะเล็ก สั้นและการแผ่กระจายสม่ำเสมอจะมีความแข็งมากที่สุด ในทางกลับกันที่ลักษณะโครงสร้างที่ผลึกแกรไฟต์ มีขนาดใหญ่ ยาว และการแผ่กระจายไม่สม่ำเสมอ จะมีความแข็งต่ำที่สุด ในด้านการต้านทานแรงดึงที่ลักษณะโครงสร้างที่ผลึกแกรไฟต์ มีลักษณะโครงสร้างที่ผลึกแกรไฟต์เล็ก สั้นและการแผ่กระจายสม่ำเสมอ จะมีความแข็งแรง

ดึงสูงสุด ส่วนลักษณะโครงสร้างที่ผลิตแกรไฟต์ใหญ่ ขาวและการแผ่กระจายไม่สม่ำเสมอ จะมีความเค้นแรงดึงต่ำสุด โดยชิ้นงานที่มีความต้านทานแรงดึงสูงสุด จะมีส่วนผสมของคาร์บอน (C) 2.84%, ซิลิกอน (Si) 1.46%, ฟอสฟอรัส (P) 0.025% จะมีค่า ความเค้นแรงดึง 365.84 N/mm.² ชิ้นงานที่มีความเค้นแรงดึงต่ำสุด จะมีส่วนผสมของคาร์บอน (C) 2.61%, ซิลิกอน (Si) 2.17%, ฟอสฟอรัส (P) 0.025% จะมีค่า ความเค้นแรงดึง 98.82 N/mm.² ชิ้นงานที่มีความแข็งสูงสุด จะมีส่วนผสมของคาร์บอน (C) 2.84%, ซิลิกอน (Si) 1.46%, ฟอสฟอรัส (P) 0.025% จะมีค่าความแข็ง 220 (HB) ชิ้นงานที่มีความแข็งต่ำสุด จะมีส่วนผสมของคาร์บอน (C) 3.47%, ซิลิกอน (Si) 3.79%, ฟอสฟอรัส (P) 0.024% จะมีค่าความแข็ง 121 (HB)

15.หนังสืออ้างอิง

กัณฑ์วิชญ์ พงษ์ปราชญ์, วัสดุวิศวกรรม, นครนายก : มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องค์กรักษ์, 2540.

ชาวลิต เชียงกุล, โลหะวิทยา, กรุงเทพมหานคร : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2542.

หริส สุตะบุตร และ เคนยิ จิยิอา, หล่อโลหะ, พิมพ์ครั้งที่ 4 กรุงเทพมหานคร : ดวงกมล, 2527.

Donald R. Askeland, The Science And Engineering of Materials, USA : Mc Graw Hill, 1989.

William F. Smith, Principles of Materials Science And Engineering, USA : Mc Graw Hill, 1990.