

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เหล็กกล้า

การศึกษาค้นคว้า เรื่องของเหล็กกล้าจัดเป็นสิ่งจำเป็นและสำคัญอย่างมากในปัจจุบัน เพราะเหล็กกล้าเป็นวัสดุประเภทโลหะที่ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางและแพร่หลายที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากเหล็กกล้าสามารถที่จะถูกผลิตเพื่อให้ได้คุณภาพตามต้องการในปริมาณมาก โดยต้นทุนการผลิตต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตเหล็กกล้าให้มีคุณสมบัติตามต้องการต่าง ๆ กันไป เช่น การผลิตเหล็กกล้าที่มีกำลังวัสดุปานกลาง (200-300 MPa) พร้อมกับการมีคุณสมบัติ Toughness และ Ductility ที่ดีมาก หรือการผลิตเหล็กกล้าที่มีกำลังวัสดุสูงมาก (5500 MPa) โดยไม่มีปัญหาเรื่อง Ductility ดังนั้นจึงไม่ใช่เรื่องน่าประหลาดใจเลยที่โลหะผสมต่าง ๆ ที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมที่ว้า ไปจะประกอบไปด้วยส่วนผสมของเหล็กและเหล็กกล้ามากกว่า 80% โดยน้ำหนัก (Honeycombe and Bhadeshia, 1995)

เหล็กกล้า หมายถึง เหล็กที่มีธาตุคาร์บอนเป็นส่วนผสม โดยจะมีคติดือหลักที่ว่าในเหล็กที่มีคาร์บอนผสมอยู่ต่ำกว่า 2% จะเรียกว่าเหล็กกล้า (ถ้าคาร์บอนมากกว่า 2% จะจัดเป็นเหล็กหล่อ) เหล็กกล้าอาจแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ

1. เหล็กกล้าคาร์บอน เป็นเหล็กที่มีธาตุคาร์บอนเป็นส่วนผสมหลักธาตุอื่น ๆ เช่น แมงกานีส, ซิลิกอน หรือ อลูมิเนียม จะใช้สำหรับใช้เพื่อออกซิเจนเป็นสำคัญ นอกนั้นจะเป็นพวกสารมลทินต่าง ๆ เช่น กำมะถัน, ฟอสฟอรัส เป็นต้น ส่วนประสิทธิภาพของการอบชุบความร้อน เช่น การเพิ่มกำลังวัสดุ จะขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนเป็นหลัก เหล็กกล้าชนิดนี้แบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทตามปริมาณของธาตุคาร์บอน คือ

- 1.1 เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ จะมีคาร์บอนไม่เกิน 0.2%
- 1.2 เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง มีคาร์บอนอยู่ในช่วง 0.2-0.5%
- 1.3 เหล็กกล้าคาร์บอนสูง มีคาร์บอนตั้งแต่ 0.5% ขึ้นไป

2. เหล็กกล้าผสม คือเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีธาตุอื่น ๆ ผสมอยู่ เช่น โครเมียม, นิกเกิล, โมลิบดีนัม เป็นต้น สำหรับแมงกานีสและซิลิกอน ถ้ามีปริมาณเกินกว่า 1% จะจัดเป็นธาตุผสมเช่นเดียวกับ เหล็กกล้าผสมแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ

- 2.1 เหล็กกล้าโลหะผสมต่ำ จะมีปริมาณธาตุผสมไม่เกิน 10%
- 2.2 เหล็กกล้าโลหะผสมสูง มีปริมาณธาตุผสมสูงเกินกว่า 10%

เหล็กกล้าคาร์บอนที่มีปริมาณธาตุคาร์บอนปานกลาง (0.2-0.5%) นั้น สามารถปรับแต่งให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานได้หลากหลาย ประกอบกับ ต้นทุนการผลิตที่ต่ำ จึงพบว่าบางครั้งหนึ่งของการผลิตเหล็กกล้าหล่อจะเป็นการผลิตเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง

เหล็กกล้าโลหะผสมต่ำนั้นได้ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับงานที่ต้องการกำลังวัสดุสูงกว่าเหล็กกล้าคาร์บอน ความต้านทานการกัดกร่อน การชดสี และ Toughness ที่ดีกว่า รวมทั้งคุณสมบัติที่ดีเป็นพิเศษอยู่แล้วของเหล็กกล้าคาร์บอน เช่น ความสามารถในการขึ้นรูป, การเชื่อม เป็นต้น

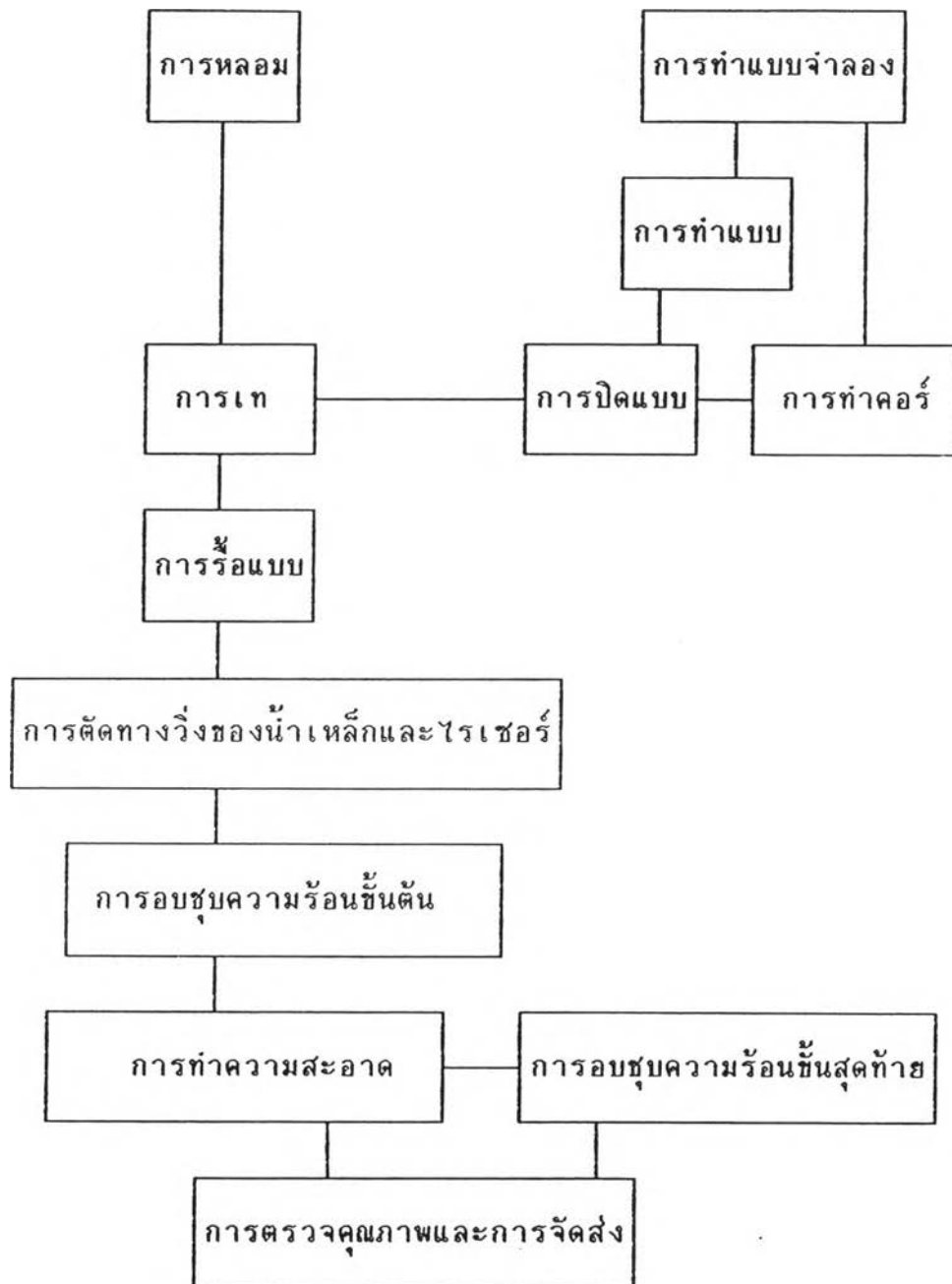
จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นนี้ จึงได้ทำการเลือกวัสดุเหล็กกล้าโลหะผสมต่ำที่มีปริมาณธาตุคาร์บอนปานกลางมาทำการทดลองในงานวิทยานิพนธ์นี้ โดยใช้เหล็กกล้าโลหะผสมต่ำคาร์บอน-แมงกานีส (C-Mn Low Alloy Steel) ที่ส่วนผสม C 0.30-0.40%, Mn 1.0-1.6% (เอกสารบางเล่มเรียก Manganese Steel) เป็นชิ้นงานตัวอย่างในการทดลองเหล็กกล้าโลหะผสมต่ำ คาร์บอน-แมงกานีส นี้ มักจะถูกนำไปใช้งานในลักษณะที่ต้องรับภาระประเภท แรงกระแทกซ้ำซ้อน (Repeated Shock) เช่น ใช้ทำรางรถไฟ, ใช้ในการสร้างถนน, โครงสร้างอาคาร, เครื่องจักรกล, อุปกรณ์เครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในโรงรีดเหล็ก, อุตสาหกรรมรถยนต์และเหมืองแร่ เป็นต้น ซึ่งเหล็กชนิดนี้ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง ทั้งนี้อีกส่วนหนึ่งก็เพราะเมื่อพิจารณาจากค่าใช้จ่าย พบว่า

เหล็กกล้าชนิดนี้มีโลหะผสมที่ราคาไม่แพง หาง่าย ใช้สะดวก ทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำ เมื่อเทียบกับโลหะผสมอื่นๆ จึงนับได้ว่าเป็นประเภทของเหล็กกล้าที่น่าสนใจอย่างยิ่ง

เหล็กกล้าหล่อ

การขึ้นรูปเหล็กกล้า (มณีส สติรจินดา, 2529) มีหลายวิธี เช่น การตีขึ้นรูป การอัดและการรีด แต่ในกรณีที่ชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลมีลักษณะรูปร่างที่ซับซ้อน จะต้องอาศัยวิธีการหล่อจึงจะสามารถกระทำได้ใกล้เคียงกับขนาดที่ต้องการ คุณสมบัติของเหล็กกล้าหล่อ เมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยการตีหรือการรีด จะมีส่วนที่แตกต่างกับก็คือ ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ผ่านการหล่อจะปรากฏมีรูพรุนเส็กา ระหว่างเกรนในขณะที่เหล็กที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยการรีดจะไม่ปรากฏมีรูพรุนชนิดนี้ นอกจากนี้ งานหล่อจะทำให้เกรนและอินคลูชัน ในลักษณะสม่ำเสมอและกระจายมากกว่าการรีด ซึ่งจะปรากฏเกรนและอินคลูชันมีลักษณะหันเหไปทิศทางของการขึ้นรูป โดยทั่วไปจะเห็นว่าการหล่อมีสวนดีและส่วนเสียที่ก้ำกึ่งกับกับงานขึ้นรูปอื่นๆ การเกิดรูพรุนเส็กา ตามขอบเกรน จะเป็นผลเสียต่อคุณสมบัติเชิงกล โดยเฉพาะความเค้นแรงดึงและอัตราการยึดตัว แต่คุณสมบัติเชิงกลจะสม่ำเสมอในทุกทิศทางของการทดสอบ สำหรับเหล็กกล้าที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยการรีดหรือการตี จะมีคุณสมบัติเชิงกลสูงในทิศทางของการรีด แต่ในทิศทางตั้งฉากกับการรีดจะมีคุณสมบัติด้อยกว่าอย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ชิ้นงานมีลักษณะซับซ้อน เช่น กังหันเทอร์ไบน์ของเครื่องปั่นไฟจากพลังน้ำจะใช้กรรมวิธีขึ้นรูปด้วยวิธีอย่างอื่นไม่ได้นอกจากการหล่อ

กระบวนการหล่อ



รูปที่ 2.1 แสดงแผนภูมิพื้นฐานของกระบวนการหล่อเหล็กกล้า

รูปที่ 2.1 เป็นแผนภูมิพื้นฐานอย่างง่ายสำหรับกระบวนการผลิตเหล็กกล้าหล่อทั่วไป (Wieser, ed., 1980) โดยที่บางครั้งกระบวนการผลิตหนึ่งๆ ก็อาจมีขั้นตอนต่างๆ ที่แตกต่างกันไปจากแผนผังนี้ ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับ ชนิดของเหล็กกล้าหล่อ, ความซับซ้อนของรูปทรงชิ้นงานและความต้องการมาตรฐาน คุณภาพของงานหล่อที่ต่างกันไปสำหรับแต่ละผลิตภัณฑ์

ทางขวามือของแผนผังเริ่มต้นด้วยการทำแบบจำลอง (Pattern) แบบจำลองนี้จะใช้สำหรับการทำแบบ และสำหรับงานหล่อบางประเภทก็ต้องการทำคอร์ดีคไว้หรือวางไว้ในแบบ เพื่อต้องการให้ชิ้นงานหล่อเกิดช่องว่าง เช่น รูหรือส่วนเว้าต่างๆ หลังจากนั้นการผลิตเหล็กกล้าหล่อก็จะเริ่มด้วยการหลอมเหล็กกล้าในเตา (ทางซ้ายมือของแผนผัง) และเมื่อขั้นตอนการหลอมเสร็จเรียบร้อยแล้วก็จะทำการถ่ายเทน้ำเหล็กหลอมไหลลงเข้าเตาเหล็ก เพื่อที่จะทำการเทน้ำเหล็กลงสู่แบบ จากนั้นก็ปล่อยให้น้ำเหล็กแข็งตัวในแบบ จึงทำการรื้อแบบงานหล่อ และตัดทางวิ่งของน้ำเหล็กกับไรเซอร์ทิ้ง (ไรเซอร์ คือ ส่วนที่เพิ่มเติมส่วนหนึ่งของงานหล่อ เพื่อทำหน้าที่เหมือนที่เก็บโลหะหลอมเหลวไว้สำหรับให้ไหลไปช่วยเติมบริเวณของงานหล่อที่จะเกิดการหดตัว) การหล่อเหล็กกล้าส่วนมากแล้วจะต้องทำการอบชุบความร้อนขึ้นต้น เพื่อขจัดความเค้นในงานหล่อและช่วยลดโอกาสที่งานหล่อจะเกิดการแตก บางครั้งขั้นตอนนี้อาจจะทำก่อนขั้นตอนการตัดทางวิ่งของน้ำเหล็กและไรเซอร์ ต่อจากนั้นชิ้นงานหล่อก็จะถูกนำไปทำความสะอาดด้วยวิธีต่างๆ และบางครั้งก็อาจมีการทำการอบชุบความร้อนพิเศษเฉพาะแต่ละงานเพิ่มเติม ขั้นตอนสุดท้ายก็คือการตรวจคุณภาพงานหล่อ และการจัดส่ง

กลุ่มโลหะแอรเรีท

การค้นพบโลหะแอรเรีทครั้งแรกเริ่มต้นขึ้นในปี ค.ศ. 1787 (Kaczmarek, 1981) โดยนายร้อยโทแห่งกองทัพบกสวีเดน C.A. Arrhenius อันเป็นการค้นพบโดยบังเอิญ จากการสังเกตโลหะที่ผิดปกติที่แตกต่างออกไปจากโลหะทั่ว ๆ ไป ที่เมือง Ytterby อันเป็นชุมชนเล็ก ๆ ไม่ไกลจากเมือง

Stockholm นครหลวงของประเทศสวีเดน และเรียกสินแร่ดังกล่าวนี้ว่า Ytterbite ในปี ค.ศ.1794 ได้มีการศึกษาค้นคว้าสินแร่ดังกล่าวนี้อย่างจริงจังโดย Johann Gadolin นักเคมีชาวฟินแลนด์ที่มหาวิทยาลัย Abo และได้พบกลุ่มธาตุโลหะชนิดใหม่ตั้งชื่อว่า แรร์เอิร์ท ซึ่งจริง ๆ แล้วเป็นชื่อที่ผิดความจริง กล่าวคือ เป็นกลุ่มโลหะที่หางายกว่าธาตุสามัญบางชนิด เช่นเงิน และเป็นธาตุที่มีความเป็นโลหะมากกว่าจะเป็นดิน การศึกษาแรร์เอิร์ทอาจแบ่งเป็นช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มมีการค้นพบจนถึงปัจจุบัน ได้เป็น 4 ช่วง (Greinacher, 1981) คือ

ช่วงแรก ปี ค.ศ.1788-1891 เป็นช่วงเริ่มต้นค้นพบได้มีการศึกษาค้นคว้าทางวิทยาศาสตร์ เกี่ยวกับคุณสมบัติต่าง ๆ โดยยังไม่มีการนำไปใช้งาน

ช่วงที่สอง ปี ค.ศ.1891-1930 เป็นช่วงที่เริ่มนำแรร์เอิร์ทไปใช้งานอุตสาหกรรม โดยนำแรร์เอิร์ทไปใช้ในลักษณะของโลหะผสมซึ่งใช้วิธีง่าย ๆ ในการสกัดแยกธาตุ

ช่วงที่สาม ปี ค.ศ.1930-1960 เป็นช่วงที่ได้มีการนำคุณสมบัติเด่น ๆ ของแรร์เอิร์ทไปใช้งานอย่างแพร่หลาย มีการเรียนรู้และเข้าใจแรร์เอิร์ทมากขึ้น รวมทั้งการพัฒนาปรับปรุงวิธีการแยกแร่และโลหะแรร์เอิร์ทอย่างมีคุณภาพมากขึ้น

ช่วงที่สี่ ตั้งแต่ปี ค.ศ.1960-ปัจจุบัน เป็นช่วงที่มีการเติบโตอย่างรวดเร็วของการนำแรร์เอิร์ทไปประยุกต์ใช้งาน ทั้ง ๆ ที่จัดเป็นโลหะที่มีราคาแพง

กลุ่มโลหะแรร์เอิร์ทมีชื่อเรียกทั่วไปอีกชื่อหนึ่งคือ แลนธาไนด์ ธาตุในกลุ่มนี้มีทั้งสิ้น 15 ชนิด (Brady and Clauser, 1979) โดยจะเริ่มตั้งแต่ธาตุที่มีเลขอะตอม 57 ถึง 71 (ดูตารางที่ 2.1) แต่อย่างไรก็ดีทาง International Union of Pure And Applied Chemistry (IUPAC) ได้รวมธาตุ Scandium (Sc, เลขอะตอม 21), Yttrium (Y, เลขอะตอม 39) และ Thorium (Th, เลขอะตอม 90) เข้าไว้ในกลุ่มนี้ด้วย เนื่องจากความคล้ายคลึงของคุณสมบัติทางเคมีและความสัมพันธ์ใกล้ชิดเชิงธรณีเคมีกับกลุ่มแรร์เอิร์ท

ตารางที่ 2.1 ตารางธาตุ

| PERIODS | METALS | | | | | | | | | | | NONMETALS | | | | | | | | |
|---------|----------------------|----------------------|---------------------|--------------------|----------------------|--------------------|---------------------|--------------------|----------------------|--------------------|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | IA | IIA | | TRANSITION METALS | | | | | | | | | | IIIA | IVA | VA | VIA | VIIA | VIIIA | |
| 1 | 1.0079 H 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | 1.0079 H 1 | 4.00260 He 2 | |
| 2 | 6.941 Li 3 | 9.01218 Be 4 | | | | | | | | | | | 10.81 B 5 | 12.011 C 6 | 14.0067 N 7 | 15.9994 O 8 | 13.998403 F 9 | 20.179 Ne 10 | | |
| 3 | 22.98977 Na 11 | 24.305 Mg 12 | | | | | | | | | | | | | 26.98154 Al 13 | 28.0855 Si 14 | 30.97376 P 15 | 32.06 S 16 | 35.453 Cl 17 | 39.948 Ar 18 |
| 4 | 39.0983 K 19 | 40.08 Ca 20 | 44.9559 Sc 21 | 47.90 Ti 22 | 50.9415 V 23 | 51.996 Cr 24 | 54.9380 Mn 25 | 55.847 Fe 26 | 58.9332 Co 27 | 58.70 Ni 28 | 63.546 Cu 29 | 65.38 Zn 30 | 69.72 Ga 31 | 72.59 Ge 32 | 74.9216 As 33 | 78.96 Se 34 | 79.904 Br 35 | 83.80 Kr 36 | | |
| 5 | 85.4678 Rb 37 | 87.62 Sr 38 | 88.9059 Y 39 | 91.22 Zr 40 | 92.9064 Nb 41 | 95.94 Mo 42 | (98) Tc 43 | 101.07 Ru 44 | 102.9055 Rh 45 | 106.4 Pd 46 | 107.868 Ag 47 | 112.41 Cd 48 | 114.82 In 49 | 118.69 Sn 50 | 121.75 Sb 51 | 127.60 Te 52 | 126.9045 I 53 | 131.30 Xe 54 | | |
| 6 | 132.9054 Cs 55 | 137.33 Ba 56 | [57-71] | 178.49 Hf 72 | 180.9479 Ta 73 | 183.85 W 74 | 186.207 Re 75 | 190.2 Os 76 | 192.22 Ir 77 | 195.09 Pt 78 | 196.9665 Au 79 | 200.59 Hg 80 | 204.37 Tl 81 | 207.2 Pb 82 | 208.9804 Bi 83 | (209) Po 84 | (210) At 85 | (222) Rn 86 | | |
| 7 | (223) Fr 87 | 226.0254 Ra 88 | † [89-103] | (261) Rf 104 | (262) Ha 105 | (263) — 106 | (262) — 107 | | (266) — 109 | | | | | | | | | | | |

| INNER TRANSITION METALS | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|-------------------|--------------------|--------------------|----------------------|--------------------|----------------------|--------------------|----------------------|--------------------|---------------------|
| 138.9055 La 57 | 140.12 Ce 58 | 140.9077 Pr 59 | 144.24 Nd 60 | (145) Pm 61 | 150.4 Sm 62 | 151.96 Eu 63 | 157.25 Gd 64 | 158.9254 Tb 65 | 162.50 Dy 66 | 164.9304 Ho 67 | 167.26 Er 68 | 168.9342 Tm 69 | 173.04 Yb 70 | 174.967 Lu 71 |
| 227.0278 Ac 89 | 232.0381 Th 90 | 231.0359 Pa 91 | 238.0289 U 92 | 237.0482 Np 93 | (241) Pu 94 | (243) Am 95 | (247) Cm 96 | (247) Bk 97 | (251) Cf 98 | (252) Es 99 | (257) Fm 100 | (258) Md 101 | (259) No 102 | (260) Lr 103 |

จากตารางที่ 2.1 แสดง ตารางธาตุ ซึ่งเป็นการจัดเรียงธาตุเพื่อความ สะดวกในการศึกษาโดยจะเรียงลำดับกันตาม เลขอะตอมและสมบัติต่าง ๆ ของธาตุ ขึ้นอยู่กับโครงสร้างอิเล็กตรอนโดยอาจแบ่งธาตุดังกล่าวออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ (อินทรา หาญพงษ์พันธ์, 2536) ดังนี้

1. ธาตุเรพรีเซนเตติฟ ได้แก่ ธาตุหมู่ IA ถึง VIIIA
2. ธาตุทรานซิชัน ได้แก่ธาตุหมู่ IB ถึง VIII B ซึ่งอยู่ตอนกลางของ ตารางธาตุ
3. ธาตุอินเนอร์ทรานซิชัน ได้แก่ธาตุอีกสองแถวซึ่งอยู่ตอนล่าง ของตารางธาตุ แถวแรกได้แก่ธาตุที่มีเลขอะตอม 57 ถึง 71 เรียกธาตุแถวนี้ว่า แรร์เอิร์ทหรือ แลนธาไนด์ ส่วนแถวที่สองเรียกว่า แอกติไนด์ เริ่มจากธาตุที่มี เลขอะตอม 89 ถึง 103

สำหรับกลุ่มโลหะแรร์เอิร์ทซึ่งอาจแบ่งย่อยออกเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่ม โลหะแรร์เอิร์ทเบา หรือกลุ่มซีเรียม ประกอบด้วยธาตุที่มีเลขอะตอม 57 ถึง 63 กับกลุ่มโลหะแรร์เอิร์ทหนัก ประกอบด้วยธาตุที่มีเลขอะตอม 64 ถึง 71 สำหรับรายชื่อธาตุ สัญลักษณ์และ เลขอะตอมของกลุ่มธาตุแรร์เอิร์ท ได้แสดงไว้ใน ตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงข้อมูลพื้นฐานของธาตุแอร်เธียม

| รายชื่อธาตุ | สัญลักษณ์ | เลขอะตอม |
|--------------|-----------|----------|
| Scandium | Sc | 21 |
| Yttrium | Y | 39 |
| Lanthanum | La | 57 |
| Cerium | Ce | 58 |
| Praseodymium | Pr | 59 |
| Neodymium | Nd | 60 |
| Promethium | Pm | 61 |
| Samarium | Sm | 62 |
| Europium | Eu | 63 |
| Gadolinium | Gd | 64 |
| Terbium | Tb | 65 |
| Dysprosium | Dy | 66 |
| Holmium | Ho | 67 |
| Erbium | Er | 68 |
| Thulium | Tm | 69 |
| Ytterbium | Yb | 70 |
| Lutetium | Lu | 71 |
| Thorium | Th | 90 |

คุณสมบัติของธาตุโลหะแรรร์เอิร์ท

โลหะแรรร์เอิร์ทจะ เกิดรวมกันเป็นกลุ่มในแร่และดินต่าง ๆ โดยจะ ไม่พบแรรร์เอิร์ทเกิดแยกตัวเดี่ยว ๆ แต่ละธาตุตามลำดับเลข การจะนำโลหะ แรรร์เอิร์ทมาใช้ประโยชน์ใด ๆ จึงควร เข้าใจคุณสมบัติที่สำคัญบางประการ ใน ที่นี้จะขอกล่าวถึง เฉพาะคุณสมบัติสำคัญที่เกี่ยวข้องดังนี้

ก. คุณสมบัติทางเคมี

พิจารณาจากโครงสร้างอิเล็กตรอนพบว่าธาตุแรรร์เอิร์ทตัวต้น ๆ จะมีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ใน $5s^2, 5p^6$ และ $6s^2$ Sub-Shell เต็มหมดในขณะที่ธาตุ แรรร์เอิร์ทที่มีเลขอะตอมสูงขึ้นจะบรรจุอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้นใน $4f$ -Sub-Shell ซึ่งจะถูก 8 อิเล็กตรอนใน Sub-Shell นอก ๆ คือ $5s^2, 5p^6$ และ $6s^2$ ซึ่งมีระดับพลังงานต่ำกว่าปกกันอยู่ ดังนั้น อิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้นจึงไม่มีผลต่อคุณสมบัติ ทางเคมีของมันเลย และทำให้ธาตุแรรร์เอิร์ททุกตัวมีคุณสมบัติทางเคมีที่เหมือน ๆ กัน และมักจะเกิดรวมกันในธรรมชาติ คุณสมบัติเด่นทางเคมีอีกอย่างหนึ่งก็คือ สารประกอบของโลหะแรรร์เอิร์ทจะมีออกซิเดชันสเตตปกติ เท่ากับ +3

โลหะแรรร์เอิร์ทมีค่าพลังงานอิเล็กตรอนแอนพิดี้ ที่สูงมากกับออกซิเจน และกำมะถันทำให้แรรร์เอิร์ทในรูปของออกไซด์หรือซัลไฟด์มีเสถียรภาพมาก แรรร์เอิร์ท ยังมีข้อดีรวมสมัยอีกอย่างคือ ไม่ก่อให้เกิดผลเสียใด ๆ กับสภาพแวดล้อม และร่างกาย มนุษย์ จากอดีตถึงปัจจุบัน แรรร์เอิร์ทยังคงเป็นส่วนประกอบของยาบางประเภท เช่น Ceriumoxalate ใช้แก้อาการเมาคลื่น หรือ Nd-Isonikotinate ใช้แก้เส้นเลือดคืบ

ข. คุณสมบัติทางโลหะวิทยา

ในทางโลหะวิทยาแรรร์เอิร์ทจัดเป็นธาตุที่สามารถกำจัดออกซิเจนและ กำมะถันได้ดีเป็นพิเศษ นอกจากนี้แล้วยังมีการนำแรรร์เอิร์ทไปใช้ในงานทางโลหการ ที่สำคัญที่สุดมีอยู่ 2 ประเภท (Greinacher, 1981) คือ

1. การผลิตเหล็กหล่อกราไฟต์กลม
2. การควบคุมรูปร่างของซิลิไซด์อินคลูชันในเหล็กกล้า

ซึ่งงานทั้งสองประเภทนี้สามารถทำให้สำเร็จได้โดยการใช้อิเรกซ์เป็นโลหะผสมที่สำคัญในปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งงานประเภทที่ 2 ก็คือเนื้อหาของงานวิจัยในที่นี้เอง อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ได้เลือกโลหะผสม Misch Metal ซึ่งมีโลหะอิเรกซ์เป็นส่วนผสมหลักมาใช้ ทั้งนี้เพราะความสะดวกในขั้นตอนการปฏิบัติ Misch Metal เป็นชื่อจากภาษาเยอรมัน (Brady and Clauser, 1979) ได้มาจากการสกัดกลุ่มโลหะอิเรกซ์จากสินแร่โดยวิธีการแยกสลายด้วยไฟฟ้า Electrolysis โดยในครั้งแรกได้สกัดมาเพื่อนำไปทำไฟแฟลชจุดบุหรือ Pyrophoric Alloys และมีส่วนผสมทางเคมีตาม Cerium Standard Alloy of The Cerium Metals Corporation ดังนี้คือ

Ce 50-55% Nd 15-17% La 22-25%

ที่เหลือจะเป็นส่วนผสมของโลหะอิเรกซ์อื่น ๆ รวมทั้งเหล็ก

ประโยชน์ของโลหะอิเรกซ์ในอุตสาหกรรม

ปัจจุบันการใช้อิเรกซ์ในอุตสาหกรรมที่ใช้เทคโนโลยีขั้นสูงมีแนวโน้มมากขึ้นทุกปี ซึ่งสามารถจำแนกตามลักษณะของการใช้ประโยชน์ได้ดังนี้ คือ

1. ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก เป็นตัวทำสีแก่เครื่องปั้นดินเผา อิฐทนไฟ
2. ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายตัวของน้ำมันปิโตรเลียม
3. ใช้ในอุตสาหกรรมแก้ว เป็นผงขดเลนส์ สารฟอกสีแก้ว เป็นสารคงตัว

ด้านสีจากแสงเหนือม่วง

4. ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ใช้เป็นตัวเก็บประจุ ชั้นประจุสารกึ่งตัวนำ ส่วนประกอบของเครื่องคอมพิวเตอร์ เป็นสารเรืองแสงในอุตสาหกรรมหลอดภาพโทรทัศน์ จอเรดาร์ จอเอกซเรย์
5. ใช้ในอุตสาหกรรมนิวเคลียร์ เป็นตัวควบคุมลำแสงนิวตรอน เป็น

เชื้อเพลิงปฏิกิริยาปริมาณสำหรับโรงไฟฟ้าปริมาณ

6. ใช้งานด้านโลหกรรม เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของโลหะผสม สำหรับปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะโดยเฉพาะอย่างยิ่งโลหะ เหล็ก

สินแร่โลหะแรร์เอิร์ทของโลก

แร่ที่มีธาตุโลหะแรร์เอิร์ทเป็นองค์ประกอบสำคัญมีประมาณ 70 ชนิด แต่มีเพียง 4 ชนิดเท่านั้นที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของโลกในปัจจุบัน คือ แร่ปัสแนชไซด์ โมนาซาไซด์ ซีโรโทม และอะพาไทต์ โดยเฉพาะแร่ปัสแนชไซด์จัดเป็นสินแร่หลักของโลหะแรร์เอิร์ทและประเทศผู้ผลิตรายใหญ่ก็คือ สาธารณรัฐประชาชนจีน สหรัฐอเมริกา และออสเตรเลีย โดยผลผลิตรวมทั้งโลกในปี ค.ศ.1989 คือ 80,250 ตัน (จ้าวูญ ฉู่ศิริไพศาล, 2535)

แร่โลหะแรร์เอิร์ทที่พบในประเทศไทย

ปัจจุบันได้มีการสำรวจและค้นพบแร่โลหะแรร์เอิร์ทในประเทศไทย (จ้าวูญ ฉู่ศิริไพศาล, 2535) ดังนี้

1. Monazite พบที่จังหวัดประจวบคีรีขันธ์, พังงา, ภูเก็ต และอุทัยธานี
2. Xenotime พบที่จังหวัดประจวบคีรีขันธ์, พังงา, ภูเก็ต และอุทัยธานี
3. Euxenite พบที่จังหวัดพังงา
4. Yttrotantalite พบที่จังหวัด พังงา, ภูเก็ต และระนอง
5. Samarskite พบที่จังหวัด พังงา และภูเก็ต
6. Flrgusonite พบที่จังหวัดพังงาและภูเก็ต
7. Zircon พบที่จังหวัดกาญจนบุรี
8. Allanite พบที่จังหวัดอุทัยธานี

อย่างไรก็ตามการผลิตและการส่งออกแร่โลหะแรร์เอิร์ทของประเทศไทยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน พบว่าได้มีการดำเนินการผลิตและส่งออกแร่ดังกล่าวเพียง 2 ชนิด คือ Monazite และ Xenotime เท่านั้น นอกจากนั้นยังพบ

ว่าไม่เคยมีการค้าเงินกิจการแร่เพื่อผลิตแร่ทั้งสองชนิดเป็นสินแร่หลัก เท่าที่เป็นอยู่ในปัจจุบันแร่ทั้งสองชนิด เป็นผลพลอยได้จากการค้าเงินกิจการเหมืองแร่หิน

เป็นที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่งว่าในปัจจุบันประเทศไทยได้มีการนำเข้าโลหะแร่เอิร์ทในรูปต่าง ๆ เป็นจำนวนมาก ซึ่งมีราคาแพง ทั้ง ๆ ที่เป็นประเทศผู้ส่งออกแร่เอิร์ท ด้วยเหตุนี้สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ จึงได้จัดตั้งโรงงานต้นแบบเพื่อแยกธาตุโลหะแร่เอิร์ทจากสินแร่โมนาไซต์ที่เทคโนโลยีโคลง 5 จังหวัดชุมพรธานี แต่การแยกสกัดธาตุดังกล่าวก็ยังไม่ประสบผลสำเร็จ

การทุบขึ้นรูป

การทุบขึ้นรูปโลหะเป็นการผลิตชิ้นงานเพื่อให้ได้รูปทรงตามต้องการ โดยการใช้ค้อนตี (Hammering) หรือการใช้แรงกด (Pressing) การทุบขึ้นรูปโลหะจัดเป็นกระบวนการผลิตงานโลหะที่เก่าแก่ที่สุด โดยเริ่มจากการใช้แรงงานมนุษย์เป็นหลัก ต่อมาในช่วงการปฏิวัติอุตสาหกรรมในยุโรปได้เริ่มมีการคิดค้นพัฒนา เพื่อนำเครื่องจักรกลต่าง ๆ มาใช้แทนที่ ปัจจุบันได้มีเครื่องมือทุบขึ้นรูปมากมายหลายชนิดซึ่งสามารถผลิตชิ้นงานขนาดเล็ก ๆ เช่น โบลท์ ไปจนถึงชิ้นงานขนาดใหญ่ เช่น เทอร์ไบน์ โรเตอร์ การทุบขึ้นรูปโลหะส่วนมากแล้วจะเป็นการขึ้นรูปร้อนขณะที่การขึ้นรูปเย็นมีอยู่บ้างเพียงเล็กน้อย โดยทั่ว ๆ ไปเราจะแบ่งเครื่องมือที่ใช้ในการทุบขึ้นรูปเป็น 2 ประเภท (Dieter, 1988) ได้แก่

1. Forging Hammer หรือ Drop Hammer เป็นการทุบขึ้นรูปโลหะโดยใช้แรงกระแทกอย่างรวดเร็ว รุนแรง ไปยังพื้นผิวของโลหะ

2. Forging Press เป็นการทุบขึ้นรูปโดยใช้แรงกดอย่างช้า ๆ นอกจากนั้นเรายังสามารถจัดแบ่งกระบวนการทุบขึ้นรูปโลหะออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

ก. Open-Die Forging คือการทุบขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์หน้าเรียบหรือแม่พิมพ์ที่มีรูปร่างไม่ซับซ้อน กระบวนการนี้มักจะถูกใช้กับงานที่มีขนาดใหญ่มากหรือเมื่อชิ้นงานมีจำนวนน้อย นอกจากนั้นกระบวนการนี้ยังถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางสำหรับ

การขึ้นรูปเบื้องต้น เพื่อที่จะเตรียมชิ้นงานสำหรับขึ้นคอนคอป

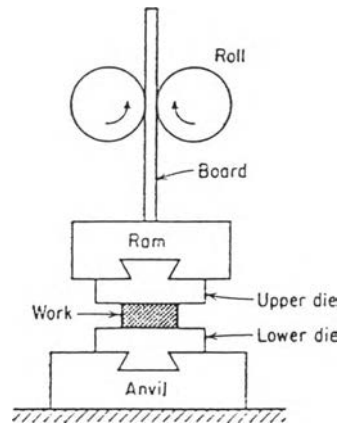
ข. Closed-Die Forging คือการขึ้นรูปชิ้นงานระหว่าง Two Die Halves เพื่อทำการขึ้นรูปชิ้นงานให้ได้รูปร่างและขนาดตามต้องการอย่างสมบูรณ์ โดยชิ้นงานจะได้รับแรงในการขึ้นรูปที่มีความดันสูง ใน Closed Cavity ซึ่งทำให้สามารถผลิตชิ้นงานได้รูปร่างและขนาดที่มีความถูกต้องแม่นยำสูง

หลักการโดยทั่วไปของการไหลของโลหะจะไหลได้ง่ายที่สุดในบริเวณ Free Surface และจะยากที่สุดในบริเวณที่สัมผัสกับแม่พิมพ์ ทั้งนี้เนื่องจากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจะคอยต้านการไหลของโลหะ

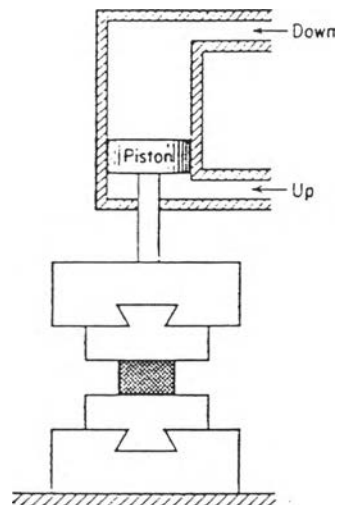
สำหรับการเตรียมชิ้นงานทดลองในงานวิจัยนี้ ได้ขึ้นรูปแบบ Open-Die Forging โดยใช้เครื่อง Forging Hammer แบบ Power ซึ่งจัดเป็นเครื่องมือการทุบขึ้นรูปที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุด เครื่องมือประเภทนี้มักจะทำงานโดยการทุบซ้ำหลาย ๆ ครั้ง ทั่วไปจะอยู่ในช่วง 60 ถึง 150 ครั้ง ต่อนาที เครื่อง Forging Hammer สามารถจัดแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ

1. Board Hammer หลักการทำงานคือจะยกแม่พิมพ์บนและนำหนักที่ใช้ทุบหรือ Ram โดยใช้ลูกรีดดังรูปที่ 2.2 และจะขึ้นรูปโดยการปล่อย Ram ให้ตกกระทบชิ้นงานภายใต้แรงโน้มถ่วง พลังงานในการทุบจะมาจากพลังงานศักย์ เนื่องจากน้ำหนักของ Ram และความสูงในการตกกระทบที่ Ram ถูกยกขึ้นไปเท่านั้น

2. Power Hammer เป็นการเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปจากแบบแรกโดย Ram จะถูกเร่งในขณะที่ตกกระทบชิ้นงานโดยความดันอากาศหรือไอน้ำเพิ่มเติมจากแรงโน้มถ่วง และอากาศหรือไอน้ำดังกล่าวก็จะใช้ในการยก Ram ขึ้นไปหลังจากการทุบชิ้นงานแล้ว ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 เครื่อง Forging Hammer แบบ Board Hammer (Dieter,1988)



รูปที่ 2.3 เครื่อง Forging Hammer แบบ Power Hammer (Dieter,1988)

อย่างไรก็ตาม เครื่องมือประเภท Hammer นี้จะไม่สามารถให้ค่าพลังงาน ที่ถูกต้องแน่นอนได้ ทั้งนี้ก็เพราะลักษณะของการขึ้นรูปโดยการกระแทกทำให้พลังงาน ค่อนข้างสูญเสียไปในการสั่นสะเทือนไปสู่ฐานรากของเครื่องหรือสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ โดยปกติ Forging Hammer จะมีเวลาการสัมผัสระหว่างการกระแทกของ Ram กับชิ้นงานสั้นมาก ประมาณ 1 ถึง 10 มิลลิวินาที

การทุบขึ้นรูปโลหะจะทำให้โครงสร้างจุลภาคเกิดการเรียงตัวในลักษณะ มีทิศทาง และอินคลูชันในเหล็กจะยึดตัวขนานไปกับทิศทางที่มีการขึ้นรูปมากที่สุด ทำให้ คุณสมบัติทางกลในทิศทางที่ตั้งฉากกับการขึ้นรูปดังกล่าวมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบระหว่าง ทิศทางทั้งสอง

ไอโซโทรปี (Isotropy)

เมื่อพิจารณาคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุหนึ่งและพบว่าค่าของคุณสมบัติดังกล่าว ไม่ขึ้นกับทิศทางคือมีค่าเหมือนกันในทุก ๆ ทิศ เราจะเรียกวัสดุนั้นว่ามีลักษณะ เป็น ไอโซโทรปี ส่วนวัสดุซึ่งมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันไปในแต่ละทิศทางจะเรียกว่า แอนไอโซโทรปี ดังนั้นเมื่อพิจารณาวัสดุที่เป็นพหุผลึกในแง่ของอุดมคติแล้ว วัสดุดัง กล่าวย่อมเป็นไอโซโทรปี ถ้าผลึกเหล่านั้นมีการเรียงตัวแบบ Random อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงแล้วการเรียงตัวของผลึกแบบ Random แทบจะไม่เคยเกิดขึ้นเลย ทั้งนี้ก็เพราะกระบวนการผลิตวัสดุหรือโลหะมักจะทำให้เกิดการจัดการเรียงตัวของ เกรนของโลหะในทิศทางที่แน่นอน ซึ่งเรียกการเรียงตัวของเกรนของโลหะนี้ว่า Texture หรือ Preferred Orientation ซึ่งระดับของการเป็นแอนไอโซโทรปี จะขึ้นกับระดับของการเรียงตัวของผลึก

อินคลูชันในเหล็กกล้า

อินคลูชัน (Osborne, 1967) คืออนุภาคโลหะหรือสารมลทินที่เจือปน อยู่ในเหล็กกล้า อยู่ในรูปของสารประกอบ อาจจะมาจกวัสดุทนความร้อนที่ใช้ใน เหน้งเตาหรือ เตา, กระบวนการใส่แก๊สออกซิเจนหรือมาจากขั้นตอนการผลิตเหล็ก

การตลุงเหล็ก โดยอนุภาคที่เจือปนมาเหล่านี้ ไม่มีโอกาสรวมตัวและลอยขึ้นไปบนผิวหน้าของขี้เหล็ก จึงแทรกอยู่ในเนื้อเหล็กกล้าเป็นอินคลูชัน

อินคลูชันในเหล็กกล้าจะมีผลต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

1. ความล้า
2. การเชื่อม
3. ความต้านทานการกัดกร่อน
4. ความสามารถในการกลึงไส
5. ความสามารถในการขึ้นรูป
6. Toughness

สำหรับงานวิจัยนี้จะ เน้นศึกษาไปที่อิทธิพลของอินคลูชันในเหล็กกล้าต่อ Toughness เป็นด้านหลัก

การเกิดอินคลูชันจะจัดแบ่งได้เป็น 2 แหล่งที่ทำให้กำเนิดดังนี้

ก. เกิดจากการตกผลึก จากการเกิดปฏิกิริยาในขี้เหล็กหลอมเหลว หรือในขั้นตอนการแข็งตัวของเหล็ก

ข. เกิดจากการกัดเซาะทางเคมีหรือทางกลของวัสดุทนความร้อน หรือวัสดุอื่น ๆ ซึ่งสัมผัสกับขี้เหล็กหลอมเหลว เช่น ทรายที่มาจากระบบทางวิ่งของแบบหล่อ

มีข้อสังเกตอยู่ว่าการเกิดอินคลูชันในขี้เหล็กหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูง ๆ อินคลูชันจะมีลักษณะกลมแต่อินคลูชันที่เกิดที่อุณหภูมิต่ำ ๆ เช่น เหล็กซิลิไซด์จะมีลักษณะเป็น Interdendritic และจะแพร่กระจายไปตามขอบเกรน นอกจากนี้ อินคลูชันส่วนมากแล้ว จะมีส่วนผสมทางเคมีที่ไมแน่นอน บ่อยครั้งที่จะพบว่าตรงกลางของอินคลูชันเป็นสารประกอบอย่างหนึ่งและบริเวณขอบรอบนอกเป็นอีกอย่างหนึ่งที่เรียกว่า เกิด Coring

Kiessling (1978) ได้จัดแบ่งอินคลูชันที่พบในเหล็กกล้าออกเป็น 6 กลุ่ม โดยอาศัยพฤติกรรมการแปรรูปของอินคลูชันเป็นหลักในการจัดกลุ่ม ได้แก่

1. อลูมินาและแคลเซียมอลูมิเนต เกิดจากขั้นตอนการใส่แก๊สในขี้เหล็กหลอมเหลว อินคลูชันกลุ่มนี้จะแข็ง เปราะและจะไม่เกิดการแปรรูปเลยในทุก ๆ

อุณหภูมิของการใช้งานเหล็กกล้า

2. ดัชนีเปลวออกไซด์ชนิด Spinel-Type มีสูตรทั่วไป คือ $AO-B_2O_3$ หรือ AB_2O_4 อินคลูชันกลุ่มนี้จะไม่เกิดการแปรรูปเลยจากช่วงอุณหภูมิห้องจนถึง 1200 องศาเซลเซียส แต่จะมีการแปรรูปข้างที่อุณหภูมิสูงกว่า 1200 องศาเซลเซียส

3. ซิลิเกต ของแคลเซียม, แมงกานีส, เหล็กและอลูมิเนียม อินคลูชันเหล่านี้ จะเปราะที่อุณหภูมิห้อง แต่จะเพิ่มความสามารถในการแปรรูปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

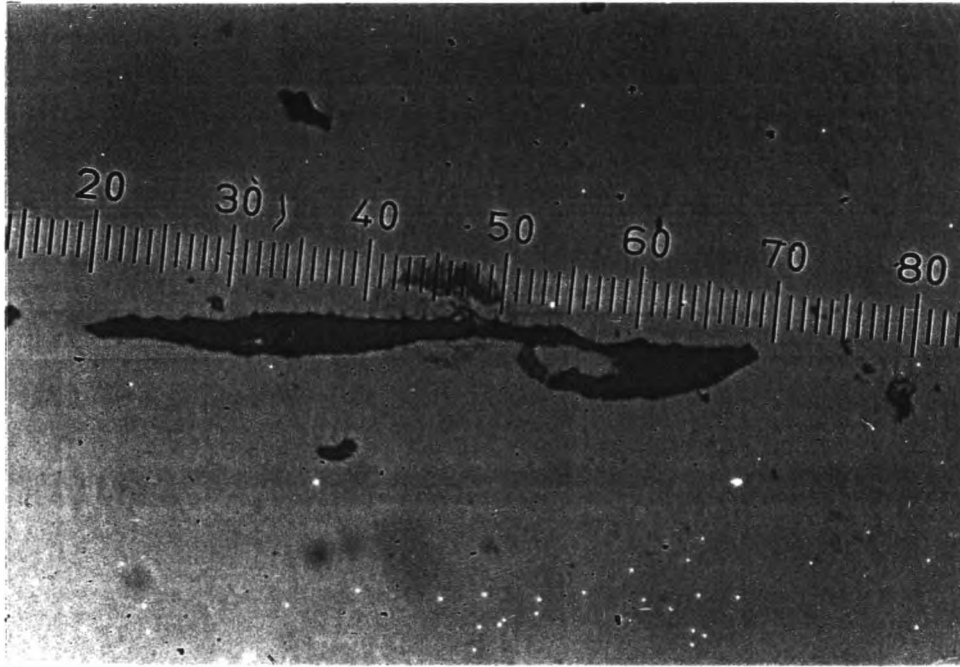
4. ออกไซด์ในรูปของ FeO, MnO และ (Fe, Mn)O อินคลูชันกลุ่มนี้จะแปรรูปได้น้อยมากที่อุณหภูมิสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส

5. ซิลิกานริสุทธิซึ่งจะไม่แปรรูปเลยจนถึง 1300 องศาเซลเซียส

6. แมงกานีสซัลไฟด์, MnS เป็นอินคลูชันที่สามารถแปรรูปได้มากที่สุด

อย่างไรก็ตามสำหรับงานวิจัยนี้จะเน้นไปที่ซัลไฟด์อินคลูชันเท่านั้น อินคลูชันดังกล่าวจะฟอร์มตัวขึ้นโดยอาศัยปฏิกิริยาเคมีในระหว่างกระบวนการแข็งตัวของน้ำ เหล็กหลอมเหลว แรงขับเคลื่อนให้เกิดปฏิกิริยาดังกล่าวก็คือการดึงจุดอิมิตัวของกัมมะดันหรือตัวไล่แก๊ซออกซิเจน เช่น แมงกานีสที่ละลายอยู่ในน้ำเหล็ก จึงตกผลึกออกมาเป็นซัลไฟด์อินคลูชัน สาเหตุของการเกิดการอิมิตัวของตัวถูกละลายในน้ำเหล็กก็คือการเติมตัวไล่แก๊ซออกซิเจนลงไปบนน้ำเหล็ก, การลดลงของอุณหภูมิของน้ำเหล็กหลอมเหลวในกระบวนการแข็งตัว ทำให้สารมลทินต่าง ๆ ละลายในน้ำเหล็กได้ลดลง จึงตกผลึกออกมาและเมื่อเหล็กเริ่มเกิดการแข็งตัวก็จะมีสารมลทินต่าง ๆ ที่ละลายอยู่ในเหล็กในสภาวะของแข็งได้น้อยมาก เช่น กัมมะดัน ออกมา ทำให้บริเวณรอยต่อของผิวหน้าสัมผัสเฟส ของแข็ง-ของเหลว มีความเข้มข้นของสารมลทินสูงเกินจุดอิมิตัวของการละลายอย่างมากจึงตกผลึกออกมา

จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วย Optical Microscopy พบว่า MnS มีสีเทาอ่อน (Samuels, 1980) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ในขณะที่ออกไซด์หรือซิลิเกตจะเป็นสีดำ



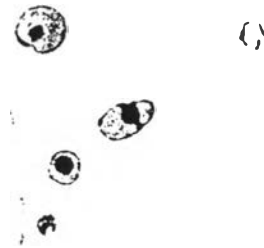
รูปที่ 2.4 แมงกานีสซัลไฟด์อินคลูชัน (สีเทาออบ) ในเหล็กกล้าที่ผ่านการขึ้นรูป
(กำลังขยาย 1000X)

รูปร่างของ MnS มีความสำคัญมากเพราะเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ ซึ่งส่งผลต่อคุณสมบัติของเหล็กโดยอินคลูชันที่มีขนาดยาวและมีปลายแหลมจะก่อให้เกิด Stress Concentration เมื่อได้รับแรงและอาจเกิด Initiating Crack, Microcrack ทำให้เกิดการแตกหักในที่สุด โดยทั่วไป MnS จะมีเหล็กปนอยู่เล็กน้อย ประมาณ 1-3% (Samuels, 1980)

MnS ที่พบในเหล็กกล้าสามารถจัดแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม คือ
กลุ่มที่ 1 มีลักษณะกลม มน กระจายอยู่ทั่วไป พบในเหล็กที่มีออกซิเจนตั้งแต่ 0.02% ดังแสดงในรูปที่ 2.5

กลุ่มที่ 2 มีลักษณะเป็นเส้นกลมยาวต่อเนื่องเป็นลูกโซ่ตามบริเวณขอบเกรน พบในเหล็กที่มีออกซิเจนต่ำกว่า 0.01% ดังแสดงในรูปที่ 2.6

กลุ่มที่ 3 มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม เป็นก้อน พบในเหล็กที่มีการใส่แก๊สออกซิเจนอย่างสมบูรณ์ Fully Killed Steel และมีปริมาณออกซิเจนอยู่ในเหล็กสูง ประมาณ 0.2% ขึ้นไป ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.5 แมงกานีสซิลิไซด์อินคลูชัน กลุ่มที่ 1 ในเหล็กกล้าหล่อ
กำลังขยาย 200 X (Samuels,1980)



รูปที่ 2.6 แมงกานีสซิลิไซด์อินคลูชัน กลุ่มที่ 2 ในเหล็กกล้าหล่อ
กำลังขยาย 1000 X (Samuels,1980)



รูปที่ 2.7 แมงกานีสซิลิไซด์อินคลูชันกลุ่มที่ 3 ในเหล็กกล้าหล่อ
กำลังขยาย 1000 X (Samuels,1980)

ปัจจุบันยังไม่สามารถอธิบายถึงเหตุผลและกลไกการพอร์มตัวของแมงกานีสซิลิไซด์อินคลูชันทั้งสามกลุ่มได้ (Samuels,1980 , Ghosh,1990) แต่อย่างไรก็ตามอินคลูชันทั้งสามกลุ่ม เป็นผลมาจากกระบวนการไล่แก๊สออกซิเจนอย่างแน่นนอน การมีอยู่ของอินคลูชัน กลุ่ม1 แสดงให้เห็นถึงการไล่ออกซิเจนที่ไม่สมบูรณ์ กลุ่มที่ 2 มีการไล่ออกซิเจนที่ดีกว่า แต่ก็จะได้ MnS ที่มีรูปร่างก่อให้เกิดผลเสียต่อคุณสมบัติทางกลมากที่สุด ส่วนกลุ่มที่ 3 มีการไล่แก๊สออกซิเจนอย่างสมบูรณ์

เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าอินคลูชันมีบทบาทที่สำคัญในการทำให้เกิดผลเสียต่อคุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้า ดังนั้นจึงมีความพยายามในการที่จะผลิตเหล็กกล้าสะอาด Clean Steel อย่างไรก็ตามไม่มีเหล็กกล้าใด ๆ ที่ใช้อยู่ในอุตสาหกรรมจะปลอดจากอินคลูชันโดยสิ้นเชิง ในส่วนของข้อดีของซิลิไซด์อินคลูชัน ก็พอมียู่บ้าง โดยเฉพาะในด้านการเพิ่มความสามารถในการกลึงไส

ปัจจัยที่สำคัญของอินคลูชันที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลของ เหล็กกล้า

1. รูปร่างของอินคลูชัน

2. ความสามารถในการแปรรูป การขยายและหดตัวของอินคลูชัน

ปัจจัยที่มีผลต่อความยาวของสลัฟไคอินคลูชันใน เหล็กกล้าที่ผ่านการขึ้นรูป

ก. ประเภทของสลัฟไคอินคลูชัน

ประเภทของสลัฟไคอินคลูชันจะยึดความล่าช้าจากมากไปน้อย ดังนี้คือ กลุ่มที่ 2, 3 และ 1 สำหรับเหตุผลเกี่ยวกับความสามารถในการยึดตัวของอินคลูชัน แต่ละกลุ่ม ปัจจุบันยังไม่ทราบชัดเจน

ข. อุณหภูมิในการขึ้นรูป

สำหรับการขึ้นรูปร้อนของเหล็กกล้าโดยทั่ว ๆ ไปในอุตสาหกรรม จะขึ้นรูป ในช่วงอุณหภูมิ 900-1200 องศาเซลเซียส และพบว่าการยึดตัวของอินคลูชันจะมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิลดลง

ค. ปริมาณการลดขนาด

การยึดตัวของอินคลูชันจะมากขึ้นตามปริมาณการลดขนาดของเหล็ก ซึ่ง ปริมาณการลดขนาด จะถูกกำหนดโดยขนาดของแท่งเหล็กที่นำมาใช้ เป็นวัตุคูณกับ ขนาดรูปทรงสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ และแนวโน้มของอุตสาหกรรมในอนาคตจะหันไปใช้ แท่งเหล็กที่มีขนาดใหญ่อขึ้นเรื่อย ๆ ดังนั้นปัญหาการยึดตัวของอินคลูชันก็จะ เพิ่มขึ้น

วิธีการแก้ปัญหากการยึดตัวของสลัฟไคอินคลูชัน

1. ลดปริมาณของกำมะถันในเหล็กให้มีค่าต่ำกว่า 0.001%

2. การเติมธาตุผสมลงไปในตัวเหล็ก เพื่อให้ไปจับกับกำมะถันแทนแมงกานีส และเกิดสลัฟไคใหม่ที่ไม่ยึดตัวในขณะที่ทำการขึ้นรูปร้อนธาตุในกลุ่มนี้ ได้แก่ Zr, Ca, Mg, Ti และ REM.

และที่จะลืมเสียมิได้ เลยก็คือการปรับปรุงวัสดุทนไฟในส่วนต่าง ๆ ของงาน หล่อ เพราะว่าการกัดเซาะวัสดุดังกล่าวอาจจะทำให้เกิดอินคลูชันขนาดใหญ่ขึ้น งานหล่อซึ่งจะก่อให้เกิดผลเสียต่อคุณสมบัติของชิ้นงาน

การควบคุมรูปร่างของซิลไฟด์อินคลูชัน

การที่จะทำให้เหล็กกล้าที่ผ่านการขึ้นรูป เช่น การรีดหรือการทูนขึ้นรูป มีคุณสมบัติทางกล เป็นไอโซโทรปีจำเป็นต้องลดปริมาณกำมะถันในเหล็กกล้าที่มีค่ามาก ๆ หรือทำให้ซิลไฟด์อินคลูชันมีรูปร่างกลม การที่จะให้อินคลูชันคงรูปร่างกลมไว้ได้นั้น อินคลูชันที่ตกผลึกอยู่ในเหล็กกล้าหล่อจะต้องสามารถต้านทานการแปรรูปในระหว่างการขึ้นรูปเหล็กกล้าดังกล่าวได้ ซึ่งสามารถทำได้โดยการเติมโลหะผสม เช่น Ca, Mg, Ti, Zr หรือ REM. ลงไปในขั้นตอนการผลิตเหล็กกล้าหล่อ โลหะผสมในกลุ่มนี้มีประสิทธิภาพและสะดวกในทางปฏิบัติโดยเกิดผลกระทบข้างเคียงน้อยที่สุด ได้แก่ REM. การใส่ REM. ลงไปในน้ำเหล็กจะทำให้ REM. ไปจับตัวกับกำมะถันแทนแมงกานีสได้แร่เอิร์ทซิลไฟด์หรือแร่เอิร์ทออกซิซิลไฟด์ดังสมการ



ซึ่งมีจุดหลอมเหลวสูงกว่า MnS (MnS มีจุดหลอมเหลว 1530 C , CeS 2450 C , Ce_3S_4 2050 C , FeS 1195 C และ CeO_2 2600 C โดยยังไม่พบข้อมูลของ $\text{Ce}_2\text{O}_2\text{S}$) มีเสถียรภาพดีกว่าและโดยเฉพาะอย่างยิ่งไม่เกิดการแปรรูปขณะทำการขึ้นรูปเหล็กกล้า อย่างไรก็ตามการเติมโลหะผสมดังกล่าวจะมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นเมื่อเหล็กกล้าได้ผ่านกระบวนการใส่กำมะถันและออกซิเจนมาระดับหนึ่งแล้ว การคงรูปร่างกลมของซิลไฟด์อินคลูชันไว้ จะสามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของเหล็กให้เป็นไอโซโทรปีหรือใกล้เคียงไอโซโทรปีได้เป็นอย่างดี

ผลกระทบของการควบคุมรูปร่างของซิลิโคนคลูชันต่อคุณสมบัติทางกล

ความล้มเหลวของวัสดุใด ๆ หรือการที่วัสดุไม่สามารถตอบสนองต่อภาระหน้าที่ซึ่งได้รับการออกแบบมาให้ทำงานมีอยู่ 3 ประการ (Dieter, 1988) คือ

1. เกิดการแปรรูปแบบ อีลาสติก มากเกินไป
2. เกิดการแปรรูปแบบ พลาสติก หรือเกิด การคราก มากเกินไป
3. เกิดการแตกหักเสียหาย

การแตกหักเสียหายก็จะเกิดได้ 3 แบบดังนี้

- ก. การแตกหักอย่างทันทีทันใดหรือการแตกเปราะ
- ข. ความล้า
- ค. การแตกหักแบบค่อยเป็นค่อยไป

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความล้มเหลวของเหล็กกล้า จากการแตกหักเสียหายอย่างทันทีทันใด โดยทำการปรับปรุงรูปร่างของซิลิโคนคลูชันในเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบขึ้นรูปร้อน

กระบวนการแตกหักเสียหายของโลหะสามารถแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน

คือ

1. การเริ่มเกิดรอยแตก
2. การสืบหน้าของรอยแตก

ลักษณะของการแตกหักเสียหายของโลหะแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ

- ก. การแตกแบบเหนียว (Ductile Fracture) โดยจะมีการแปรรูปแบบพลาสติก ก่อนจะแตกหักซึ่งจะสังเกตเห็นชัดเจนบริเวณผิวหน้ารอยแตก
- ข. การแตกแบบเปราะ (Brittle Fracture) จะมีการสืบหน้าของรอยแตกอย่างรวดเร็ว โดยไม่มีการแปรรูปแบบพลาสติก หรือน้อยมาก

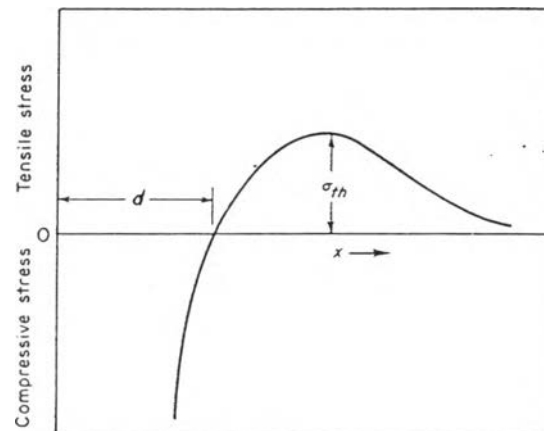
ปัจจัยที่มีผลต่อการแตกเปราะ คือ

1. อุณหภูมิ

2. อัตราความเครียด

3. สภาพความเค้น

จากความรู้พื้นฐานที่ว่ากำลังวัสดุมาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมของวัสดุนั้น ดังนั้นวัสดุใดมีแรงยึดเหนี่ยวดังกล่าวมากก็จะมีกำลังวัสดุสูง การศึกษาเรื่องการแตกหักของวัสดุโดยเฉพาะโลหะก็อาศัยความรู้ดังกล่าวเป็นสำคัญ การคำนวณหาค่า Fracture Strength ตามทฤษฎีอาจพิจารณาได้ดังนี้



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมในสถานะของแข็งกับระยะห่างระหว่างอะตอม (Reed-Hill and Abbaschian, 1992)

จากรูปที่ 2.8 แสดงผลลัพธ์ระหว่างแรงผลึกและแรงดึงดูดระหว่างอะตอมเมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอก

โดย d = ระยะห่างระหว่างอะตอมในสถานะสมดุลปกติ

σ_{fh} = Fracture Strength จากการคำนวณตามทฤษฎี

x = การเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างอะตอม

จากรูป 2.8 ถ้าวัสดุถูกกระทำด้วยแรงดึงจากภายนอกจนถึงจุดหนึ่งซึ่งแรงหลักระหว่างอะตอมน้อยมากจนแทบไม่มีเลยและแรงดึงลดลง เนื่องจากระยะห่างระหว่างอะตอม จุดดังกล่าวจะเป็นค่าสูงสุดของกราฟซึ่งก็คือค่ากำลังวัสดุ Fracture Strength ในทางทฤษฎีของวัสดุ จากกราฟในรูป 2.8 สามารถประมาณค่าความเค้นได้ด้วยฟังก์ชัน Sine Curve ดังนี้

$$\sigma = \sigma_{th} \cdot \sin\left(\frac{2\pi x}{T}\right) \quad (2.4)$$

โดยที่ σ = applied stress

T = ความยาวคลื่น ซึ่ง $\frac{T}{4}$ คือค่าของ x เมื่อ $\sigma = \sigma_{th}$

โดยทั่วไป ระยะขจัด x จะมีค่าน้อยมาก ทำให้ $\sin x \approx x$ ดังนั้นจาก (2.4)

$$\sigma = \sigma_{th} \cdot \left(\frac{2\pi x}{T}\right) \quad (2.5)$$

เมื่อระยะ x น้อยมาก และพิจารณาว่าเป็นวัสดุเปราะ ดังนั้นสามารถประเมินใช้กฎของฮุก

$$\sigma = E \cdot \frac{x}{d} \quad (2.6)$$

โดย E = โมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ

(จาก (2.5) และ (2.6))

$$\sigma_{th} = \frac{E \cdot T}{2\pi d} \quad (2.7)$$

งานค้ำพื้นหนึ่งหน่วยที่ใช้กับพื้นผิวในการทำให้เกิดการแตกหัก สำหรับวัสดุเปราะคือพื้นที่ภายใต้กราฟในรูป 2.8

$$W = \int_0^{r/2} \sigma_{th} \cdot \sin\left(\frac{2\pi x}{\tau}\right) dx = \frac{\sigma_{th} \cdot \tau}{\pi} \quad (2.8)$$

ซึ่งพลังงานที่ทำให้เกิดการแตกหักนี้จะมีค่าเท่ากับพลังงานที่ต้องใช้ในการก่อให้เกิด Fracture Surface ใหม่อีกสองพื้นผิว ดังนั้น

$$2\gamma = \frac{\sigma_{th} \cdot \tau}{\pi} \quad (2.9)$$

โดย γ = Surface Energy

แทนค่า $\frac{\tau}{\pi}$ จาก (2.9) ใน (2.7)

$$\sigma_{th} = \left(\frac{E \cdot \gamma}{d}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.10)$$

สมการ (2.10) ใช้สำหรับการคำนวณค่า Fracture Strength ความทฤษฎี อย่างไรก็ตามวัสดุในงานวิศวกรรมจะมีค่า Fracture Strength น้อยกว่าค่าที่คำนวณความทฤษฎีจากสมการ (2.10) 10 ถึง 1000 เท่า จากการศึกษพบว่า การเกิดจุดบกพร่องหรือความไม่ต่อเนื่องภายในเนื้อวัสดุ เช่น รูพรุน หรืออินคลูชันส่งผลให้การกระจายของแรงหรือความเค้นที่เกิดขึ้นไม่มีความสม่ำเสมอในบริเวณที่เกิดความไม่ต่อเนื่องดังกล่าวขึ้นซึ่งจะทำให้บริเวณดังกล่าวมีความเค้นสูงกว่าบริเวณอื่น ๆ เรียกว่า Stress Raiser หรือ Stress Concentration และอาจพัฒนาเกิดเป็นรอยร้าวโดยรอยร้าวเล็ก ๆ เหล่านี้เมื่อได้รับภาระหรืออยู่ในสภาวะที่เหมาะสมก็จะเกิดการคืบต่อไปจนเกิดการแตกหักเสียหายได้ในที่สุด

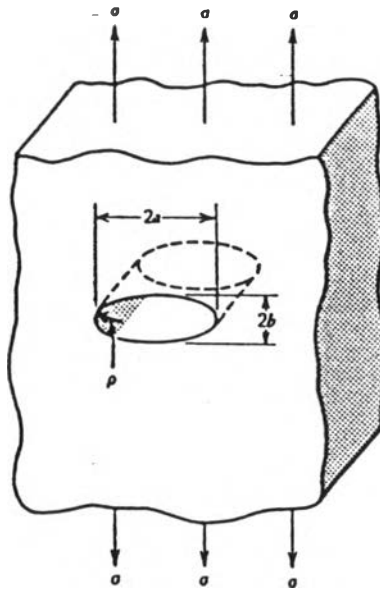
การแสดงปริมาณของ Stress Concentration อาจแสดงด้วย Stress Concentration Factor, K_t ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$K_t = \frac{\text{ความเค้นที่จุดบกพร่อง}}{\text{ความเค้นเฉลี่ยของวัสดุทั้งชิ้น}} \quad (2.11)$$

จากที่กล่าวมาข้างต้นทำให้การออกแบบงานโครงสร้างต่าง ๆ ทางวิศวกรรมไม่สามารถจะพิจารณาค่ากำลังวัสดุโดยมิได้ทดสอบหรือศึกษาอย่างรอบคอบไว้ ทั้งนี้เพราะวัสดุในงานวิศวกรรมมักจะมีจุดบกพร่องดังกล่าวยูอยู่เสมอ อันเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้เกิดการใช้ Safety Factor กับค่ากำลังวัสดุ

ทฤษฎีของ Griffith (1924) เป็นการอธิบายครั้งแรกถึงความแตกต่างระหว่างคุณสมบัติทางกลจากการคำนวณที่เกิดขึ้นจริง ทฤษฎีนี้กล่าวว่า การที่ความเค้นสูงสุดของวัสดุแก้วที่ได้จากการทดลองมีค่าต่ำกว่าค่าจากการคำนวณประมาณ 100 เท่า ก็เพราะการมีจุดบกพร่องอยู่ในเนื้อแก้ว ซึ่งทำให้เกิด Stress Concentration ขึ้นมาทำให้ค่าความเค้นที่บางส่วนของชิ้นงานมีค่าสูงกว่าความเค้นเฉลี่ยและอาจมีค่าสูงถึงค่าวิกฤตตามทฤษฎีก่อนความเค้นเฉลี่ย อย่างไรก็ตามทฤษฎีของ Griffith สามารถทำนายค่า Fracture Strength ได้ถูกต้องเฉพาะกับวัสดุที่เปราะอย่างสมบูรณ์ เช่น แก้ว เตาขึ้น ถึงกระนั้นก็ตามทฤษฎี Griffith ก็มีอิทธิพลอย่างใหญ่หลวงต่อแนวคิดเรื่องการแตกหักของโลหะ

ในการคำนวณหาค่า Stress Concentration ของโลหะในปัจจุบันไม่ใช้วิธีของ Griffith แต่จะใช้วิธีของ Orowan (1948) โดยศึกษาจากจุดบกพร่องรูปวงรีในโลหะแผ่นดังแสดงในรูป 2.9



รูปที่ 2.9 จุดบกพร่องรูปวงรีในโลหะแผ่น (Hertzberg, 1989)

จากรูปที่ 2.9 แสดงจุดบกพร่องรูปวงรีในโลหะแผ่นซึ่งก่อให้เกิด Stress Concentration และ Orowan ได้ทำการหาค่า Stress Concentration โดยใช้การคำนวณค่าความเค้นของ Inglis (1913) ซึ่งได้รับการยืนยันทั้งจาก Dieter (1988), Hertzberg (1989) และ Reed-Hill (1992) ได้ค่าความเค้นที่ปลายวงรี

$$\sigma_e = 2 \cdot \sigma \cdot \left(\frac{a}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.12)$$

โดยที่ σ_e = ความเค้นที่ปลายวงรี

$2a$ = ความยาวของวงรี

σ = ความเค้นเฉลี่ยของ applied stress

ρ = รัศมีส่วนโค้งของปลายวงรี

จากสมการ (2.10)

$$\sigma_{th} = \left(\frac{E \cdot \gamma}{d} \right)^{\frac{1}{2}}$$

ถ้าการแตกหักเกิดขึ้น σ_c ต้องเท่ากับ σ_{th}

$$2 \cdot \sigma \cdot \left(\frac{a}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{E \cdot \gamma}{d} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\sigma = \left[\frac{E \cdot \gamma}{4d} \frac{\rho}{a} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.13)$$

จากสมการ (2.13) พบว่า ถ้าความยาวของวงรี a เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความเค้นที่ต้องใช้ในการเกิดการแตกหักลดลง ซึ่งก็หมายความว่าเมื่อรอยร้าวหรือรอยแตกเริ่มเกิดขึ้นจะสามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร่งให้เร็วขึ้นเรื่อยๆ และถ้าการควบคุมซิลไฟด์อินคลูชันให้มีลักษณะกลมประสมผลสำเร็จย่อมลดค่า Stress concentration ทำให้วัสดุรับภาระได้มากขึ้น เป็นการเพิ่มคุณสมบัติทางกลและจากรูปร่างกลมของอินคลูชันดังกล่าวทำให้วัสดุมีลักษณะของไอโซโทรปีนั่นเอง

การสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งทำมาแล้ว

Dahl และคนอื่น ๆ (1966) ได้ทำการวิจัยศึกษาพฤติกรรมของซิลไฟด์ประเภทต่าง ๆ โดยการรีดร้อนเหล็กกล้าและการเกิดผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกล การทดลองทำโดยการรีดร้อนเหล็กกล้าคาร์บอน (C 0.07-0.2%) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่า แมงกานีสซิลไฟด์อินคลูชันแต่ละประเภทจะยึดตัวไม่เท่ากัน โดยกลุ่มที่ 1 จะเกิดการยึดตัวน้อยกว่ากลุ่มที่ 2 และ 3 ที่สภาวะเดียวกัน และการยึดตัวของอินคลูชันดังกล่าวจะลดลงเมื่ออุณหภูมิการรีดสูงขึ้น การทดสอบแรงกระแทกได้ค่าอัตราส่วนของพลังงานรับแรงกระแทกในทิศทางการรีดต่อทิศทางขวางการรีดเพิ่มขึ้นตามการยึดตัวของอินคลูชัน

Luyckx และคนอื่น ๆ (1970) ได้ทำการวิจัยการควบคุมรูปร่างของ ซัลไฟด์ในเหล็กกล้าโลหะผสมต่ำทนแรงดึงสูงชนิด VAN-80 (C 0.16%) และ การควบคุมรูปร่างของอินคลูชันโดยใช้โลหะผสมแคลเซียม, แรร์เอิร์ทซิลิไซด์ RESi และ Misch Metal MM. ใสในเตาแต่ละเตา จากนั้นนำแท่งเหล็กจากการหลอม มาผ่านการรีดร้อนที่ 900 C จนให้ความหนา 0.25 นิ้ว (ไม่ได้ออกความหนา เริ่มคืบจึงไม่ทราบเปอร์เซ็นต์การลดขนาด) จากนั้นนำชิ้นงานมาทดสอบโครงสร้างจุลภาค, แรงดึง, การรับแรงกระแทก และทดสอบความสามารถในการขึ้นรูป โดยใช้วิธีการตัดโค้ง ผลปรากฏว่าแคลเซียมมีประสิทธิภาพน้อยมากเมื่อเทียบกับ แรร์เอิร์ท เพราะมีการสูญเสียในขั้นตอนการผสมมากจึงต้องเติมในปริมาณสูง เกิดความไม่แน่นอน ส่วน RESi ก็ต้องใช้ปริมาณถึง 3 เท่าของ MM. จึงจะสามารถ ปรับปรุงคุณสมบัติทางกลได้เท่ากับ สำหรับ MM. พบว่าไม่ส่งผลใด ๆ ต่อการ ทดสอบแรงดึงและโครงสร้างจุลภาคของ Matrix ของเนื้อเหล็ก แต่สามารถ เพิ่มค่าพลังงานรับแรงกระแทกในทิศทางขวางการรีดได้ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ที่ อัตราส่วนซีเรียมต่อกำมะถันในช่วง 1.5 ถึง 2 และที่ช่วงอัตราส่วนเดียวกัน สามารถปรับปรุงความสามารถในการตัดโค้งได้เป็นอย่างดีที่รีสมิการตัดโค้งเท่ากับ 2 เท่าของความหนาแผ่นเหล็กโดยพบรอยแตกเพียงเล็กน้อยขณะที่แผ่นที่ไม่ได้ควบคุม รูปร่างของซัลไฟด์อินคลูชันมีรอยแตกขนาดใหญ่และจำนวนมากกว่ามาก การตรวจ จุลโครงสร้างพบซัลไฟด์อินคลูชันมีรูปร่างกลมหรือเกือบกลมโดยไม่เกิดการยึดตัว

Kozasu, Shimizu และ Kubota (1973) ได้ทำการวิจัยผลกระทบ ของอินคลูชันคือ Ductility และ Toughness ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (C 0.1%) ที่ผ่านการรีดร้อนจนให้ความหนา 20 มม. พบว่า อินคลูชันมีผลกระทบคือ Ductility อย่างชัดเจนโดยการแตกหักจะเริ่มจากรอยร้าวของอินคลูชันที่ยึดตัว และเมื่อทำการควบคุมความสะอาดของเหล็กกล้าหรือปริมาณอินคลูชันในเหล็กให้ คงที่ การเปลี่ยนรูปร่างของอินคลูชันที่ยึดตัวจากการขึ้นรูปให้มีลักษณะกลมจะ สามารถปรับปรุง Ductility ได้ กลไกของอินคลูชันที่ส่งผลคือ Toughness

นั้นซับซ้อนมาก แต่ยืนยันได้จากการทดลองว่าการยึดตัวของอินคลูชันส่งผลให้เหล็กเกิดการแตกเปราะ

Tomita (1988) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับอิทธิพลของปริมาณการลดขนาดเหล็กกล้ากำลังวัสดุสูง AISI 4340 (คาร์บอน 0.4%) ที่ผ่านการรีดร้อน ต่อ Fracture Toughness พบว่า เหล็กแผ่นรีดร้อนที่ลดปริมาณการลดขนาดจากการลดขนาด 98 เปอร์เซ็นต์ความหนาลงมาที่ 80 เปอร์เซ็นต์ความหนา สามารถปรับปรุงค่า Fracture Toughness ได้เพิ่มขึ้นประมาณ 45% และการยึดตัวของซิลไฟด์อินคลูชันก็ลดลง

Ray, Paul และ Jha (1995) ได้ทำการวิจัยผลกระทบของอินคลูชันต่อคุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าโลหะผสมต่ำทนแรงดึงสูง ซึ่งผ่านการรีดร้อนจนได้ความหนา 7 มม. จำนวน 3 ชิ้นงานทดลองโดยทั้ง 3 ชิ้นมีปริมาณคาร์บอนและกำมะถันที่แตกต่างกัน (คาร์บอนต่ำสุด 0.08% สูงสุด 0.12% และกำมะถันต่ำสุด 0.005% สูงสุด 0.034%) พบว่าทิศทางของการทดสอบแรงดึงไม่ก่อให้เกิดผลต่างใด ๆ ของค่ากำลังวัสดุ แต่เปอร์เซ็นต์การยึดตัวของเหล็กในทิศทางขวางการรีดจะน้อยกว่าทิศทางการรีดประมาณถึง 35% ความสะอาดของเหล็กกล้าหรือเหล็กที่มีปริมาณกำมะถันน้อยกว่าจะมีผลต่อค่าพลังงานรับแรงกระแทกอย่างชัดเจน ปริมาณ เติร์ลโลด์ที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณคาร์บอนมีผลทำให้ค่าพลังงานรับแรงกระแทกลดลง แต่ก็มีผลน้อยมากเมื่อเทียบกับผลจากซิลไฟด์อินคลูชัน