

บทที่ 2

ทฤษฎีและวรรณกรรมปริทัศน์

2.1 เครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า (Electrical discharge machine : EDM)

กระบวนการกัดโลหะด้วยไฟฟ้า (Electrical discharge machine : EDM) เป็นประเภทหนึ่งของกระบวนการกำจัดเศษวัสดุโดยไม่ใช้วิธีทางกล (Non-Traditional manufacturing) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานความร้อนที่เกิดจากการสปาร์คทางไฟฟ้า ทำให้อนุภาคของวัสดุถูกแยกออกมา ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส [Abbas, Solomon, & bahari, 2007] เป็นวิธีการที่ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในการใช้ผลิตแม่พิมพ์ และแบบหล่อ รวมถึงการนำไปใช้ในการเก็บรายละเอียดชิ้นส่วนต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นชิ้นส่วนของยานอวกาศ อุตสาหกรรมยานยนต์ ส่วนประกอบที่เกี่ยวข้องกับงานทางด้านศัลยกรรม [Ho, & Newman, 2003] และเมื่อไม่นานมานี้ได้นำเอากระบวนการกัดโลหะด้วยไฟฟ้ามาใช้เจาะวัสดุเซรามิกส์ที่ไม่นำไฟฟ้า โดยใช้วิธีการช่วยอิเล็กโทรดสปาร์ค (Assisting Electrode Method : AEM) [อภิวัฒน์ มุตตามระและคณะ, 2549]



ภาพที่ 2.1
เครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า

กระบวนการกัดโลหะด้วยไฟฟ้าได้ถูกพัฒนาขึ้นในช่วงทศวรรษ 1940 [Singh, Maheshwari, & Pandey, 2004] กระบวนการนี้เป็นอีกหนึ่งกระบวนการที่นิยมใช้กับวัสดุที่นำไฟฟ้า มีความแข็งสูง และใช้ผลิตชิ้นงานที่มีลักษณะซับซ้อน โดยใช้แรงกำจัดเศษวัสดุที่น้อยมาก ซึ่งนั่นก็เป็นเรื่องยากมากที่กระบวนการกัดแบบปกติ (Conventional machining) จะทำได้ การใช้แรงกำจัดเศษวัสดุที่น้อยมากนั้น เกิดจากการที่อิเล็กโตรดกับชิ้นงานไม่เกิดการสัมผัสกันเลยในกระบวนการดังกล่าว [Malhotra, Rani, & Singh, 2008]

2.2 กระแสไฟฟ้า (Discharge current) และความต่างศักย์วงจรเปิด (Open-circuit voltage)

ความต่างศักย์วงจรเปิด (V_g) ที่ต่างกันระหว่างอิเล็กโตรดและชิ้นงาน ทำให้เกิดการถ่ายเทประจุและการไหลของกระแสไฟฟ้า (I_p) ในขณะสปาร์คจะมีกระแสไฟฟ้าที่มีความหนาแน่นสูงมากไหลในช่วงเวลาสั้น ๆ โดยกระแสไฟฟ้าอาจมีขนาดตั้งแต่ 0.1 แอมป์ ถึงหลายร้อยแอมป์ พลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมาในช่วงนี้ ทำให้บริเวณที่เกิดการสปาร์คมีอุณหภูมิสูงมาก โดยอาจสูงถึง 20,000 องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) [Boothroyd, & Winston, 1989, McGeough, 1988]

2.3 เวลาเปิด (On time : T-on) และ เวลาปิด (Off time : T-off) และค่าปัจจัยประสิทธิภาพ

เวลาเปิด คือ ช่วงเวลาที่เกิดการถ่ายเทประจุหรือเวลาการปล่อยกระแส โดยเมื่อความต่างศักย์ระหว่างอิเล็กโตรดและชิ้นงานสูงขึ้น นำไปสู่การปลดปล่อยพลังงานจนทำให้เกิดการสปาร์คที่ผิวของชิ้นงาน

เวลาปิด คือ ช่วงเวลาที่หยุดการสปาร์ค หรือช่วงเวลาที่ไม่มีกระแสไหลจากอิเล็กโตรดไปที่ชิ้นงาน ทำให้ของเหลวตัวกลางสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมก่อนแตกตัวได้

เมื่อค่าของช่วงเวลาการสปาร์คเปลี่ยนไป จะมีผลทำให้ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ (Duty Factor : τ) เปลี่ยนไปด้วย ตามสมการ ดังนี้

$$\text{ปัจจัยประสิทธิภาพ} = [(\text{เวลาเปิด}) / (\text{เวลาเปิด} + \text{เวลาปิด})] \times 100\% \quad \dots(1)$$

2.4 วัสดุอิเล็กโทรด (Electrode Material)

อิเล็กโทรดในกรรมวิธีการกัดโลหะด้วยไฟฟ้า จะใช้กำหนดรูปร่างของชิ้นงาน หรือรูปที่ต้องการเจาะ ดังนั้น จึงต้องพิจารณาส่วนประกอบของอิเล็กโทรด และชนิดของวัสดุที่ใช้ปกติแล้วค่าใช้จ่ายในการทำอิเล็กโทรดจะประมาณเท่ากับ หรือมากกว่า 50% ของค่าใช้จ่ายการแปรรูปทั้งหมด จะเห็นว่าการเลือกจำนวนอิเล็กโทรดที่ใช้งานมีความสำคัญมาก

คุณสมบัติของอิเล็กโทรดในกรรมวิธีการกัดโลหะด้วยไฟฟ้า

1. เป็นตัวนำไฟฟ้าและนำความร้อนที่ดี
2. มีจุดหลอมละลายและจุดเดือดสูง
3. ต่อด้านการกัดเซาะจากไฟฟ้า หรือ การสึกหรอต่ำ

2.5 อิเล็กโทรดทองแดง (Copper electrode)

คุณสมบัติทางกายภาพของทองแดง เป็นดังนี้

- จุดหลอมเหลว : 1084 องศาเซลเซียส (ซ.)
- ความหนาแน่น : 8.94 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (ก./ซม.³)
- สัมประสิทธิ์การขยายตัวด้วยความร้อน : 16.5×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส

สามารถนำไฟฟ้า และนำความร้อนได้ดี ทนต่อการสึกหรอ และทนต่อการกัดกร่อน
อิเล็กโทรดทองแดงที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คือ แท่งทองแดง (Pure Copper)



ภาพที่ 2.2

อิเล็กโทรดทองแดง

(ที่มา : Kunshan Wanglong Special Steel Co., Ltd., <http://ccne.mofcom.gov.cn>)

ข้อดีอิเล็กทรอนิกส์

- ทองแดงสามารถใช้งานทั้งประเภทงานกัดหยาบและงานกัดละเอียด
- ให้อัตราการกัดเนื้อโลหะสูง และการสึกหรอต่ำ

ข้อเสียอิเล็กทรอนิกส์

- มีน้ำหนัก
- การขยายตัวทางความร้อนสูง
- รูปทรงไม่เสถียรเมื่อมีขนาดบาง

2.6 วัสดุชิ้นงาน (Workpiece material)

วัสดุที่สามารถนำมาใช้ในกรรมวิธีได้ โดยส่วนใหญ่นิยมใช้วัสดุที่นำไฟฟ้าได้ ซึ่งความแข็งของวัสดุไม่เป็นอุปสรรคต่อกระบวนการกัดโลหะด้วยไฟฟ้า เนื่องจากเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า สามารถแปรรูปโลหะพวกเหล็กกล้า (Mild steel), เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High carbon steel), อลูมิเนียม, ทังสเตน และคาร์ไบด์ เป็นต้น

2.7 ชิ้นงานทดสอบ – เหล็กเพลลาขาว (JIS SS400)

เหล็กเพลลาขาวหรือเหล็กเหนียว เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีปริมาณคาร์บอนผสมอยู่ไม่เกิน 0.2% นอกจากคาร์บอนแล้ว ยังมีธาตุอื่น ๆ ผสมอยู่ด้วย แต่มีผสมอยู่น้อยจนแทบจะไม่มี ความสำคัญ มีคุณสมบัติเหนียวแต่ไม่แข็งแรงมากนัก นำไปอัดขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วนที่มีลักษณะ บาง ๆ ได้ง่าย ไม่สามารถนำไปชุบแข็งได้ แต่ถ้าต้องการชุบแข็งต้องใช้วิธีเติมคาร์บอนที่ผิวก่อน เนื่องจากมีคาร์บอนอยู่น้อย เหล็กกล้าชนิดนี้ ใช้สำหรับงานโครงสร้างทั่วไป มีคุณสมบัติในการ เชื่อมที่ดี สามารถเชื่อมต่อได้ง่าย เป็นโครงสร้างต่าง ๆ ใช้ในการก่อสร้างตึก ก่อสร้างสะพาน สร้าง เรือ หรือใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ และยังเป็นเหล็กกล้าที่มีราคาไม่แพงอีกด้วย สามารถหาซื้อ ได้ง่ายตามท้องตลาด

2.7.1 คุณลักษณะทั่วไป (General Characteristics)

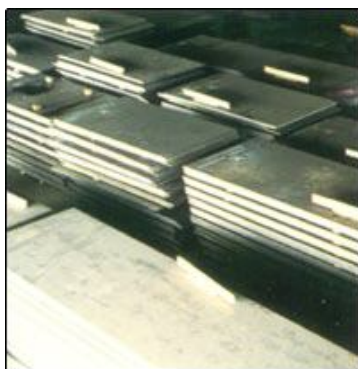
ตารางที่ 2.1

ส่วนประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนัก) ของวัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการวิจัย

ส่วนผสมทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)	C	Mn	S	N	P
	< 0.15	0.2 - 0.5	<0.05	<0.007	<0.05

2.7.2 คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties)

- ความจุความร้อนจำเพาะที่ 20°C : 0.45 จูลต่อกรัมเซลเซียส
- ความหนาแน่น (Density) : 7.85 (ก./ซม.³)
- สัมประสิทธิ์การขยายตัวด้วยความร้อน : 15×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส
- ค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่น : 375-500 เมกะปาสคาล



ภาพที่ 2.3

ชิ้นงานเหล็กเพลาลาว

(ที่มา : Marsden International, “www.marsdeninternational.co.nz”)

2.8 ของเหลวตัวกลาง (Dielectric fluid)

ในการกักโลหะด้วยไฟฟ้านั้น จำเป็นต้องใช้ของเหลวตัวกลางกั้นระหว่างอิเล็กโตรดกับชิ้นงาน ถ้าความต้านทานของของเหลวตัวกลางระหว่างขั้วมีค่าสูง สามารถที่จะทำให้เกิดการสปาร์คด้วยแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นได้ รวมทั้งสามารถย่นระยะห่างระหว่างขั้วให้แคบลงได้อีกด้วย

2.8.1 หน้าที่ของของเหลวตัวกลาง

ของเหลวตัวกลางที่จะใช้กับเครื่องกักโลหะด้วยไฟฟ้า ทั่วไป ๆ ควรจะมีหน้าที่ ดังนี้

1. เป็นฉนวนไฟฟ้า (Insulator) เพื่อลดความรุนแรงของการสปาร์คระหว่างอิเล็กโตรดกับชิ้นงาน
2. เป็นสารหล่อเย็น (Coolant) อุณหภูมิที่เกิดจากการสปาร์คจะอยู่ที่ประมาณ 10,000 องศาเซลเซียส ภายในเวลาเศษส่วนล้านของวินาที ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นจะต้องระบายออก ดังนั้นของเหลวตัวกลางจึงทำหน้าที่ระบายความร้อนออกจากชิ้นงานและอิเล็กโตรด ความร้อนที่สูงเกินไปจะทำให้อิเล็กโตรดสึกกร่อนมาก ในเวลาเดียวกันไอของโลหะจะกลั่นตัวในของเหลวตัวกลางด้วย
3. เป็นสารไหลเวียน (Flushing) โดยทำหน้าที่พัดพาเอาอนุภาคโลหะที่เกิดจากการแปรรูปด้วยการวิธีกักโลหะด้วยไฟฟ้าที่อยู่ในช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรดกับชิ้นงาน เพื่อให้การสปาร์คเกิดขึ้นในสภาพที่สมบูรณ์

2.8.2 คุณสมบัติของของเหลวตัวกลาง

1. มีความหนืดต่ำ
2. มีจุดเดือดสูง และจุดวาบไฟสูง
3. มีคุณสมบัติความเป็นฉนวนสูง
4. ไม่เป็นอันตรายต่อร่างกายและผิวหนัง
5. ต้องไม่เกิดแก๊สที่เป็นอันตรายจากการแตกตัวเนื่องจากความร้อน
6. ไม่กัดกร่อนชิ้นงาน และมีความสามารถในการระบายความร้อนได้ดี

2.8.3 ชนิดของของเหลวตัวกลาง

ของเหลวตัวกลางที่จะใช้กับเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. น้ำปราศจากไอออน (De-ionized water) หรือน้ำบริสุทธิ์ ในสภาวะปกติ น้ำหรือสารละลายน้ำจะมีไอออนผสมอยู่ในปริมาณมาก จึงทำให้มีค่าความต้านทานที่ต่ำ ดังนั้นเวลาที่จะแปรรูปโลหะจึงจำเป็นต้องผ่านกระบวนการที่จะทำให้มีค่าความต้านทานสูงขึ้น ด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น วิธีการสับเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) เพื่อจับทั้งไอออนบวกและลบออกจากน้ำ
2. สารไฮโดรคาร์บอน ที่นิยมใช้กันมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน ได้แก่ น้ำมัน (Oil) น้ำมันก๊าด (Kerosene) น้ำมันจักร (Spindle oil) น้ำมันเครื่องกล (Machine oil) น้ำมันซิลิโคน (Silicone oil) และน้ำมันแร่ (Mineral oil) เป็นต้น

2.9 อัตราการขจัดเนื้องาน (Material Remove Rate : MRR)

ในกระบวนการกัดโลหะด้วยไฟฟ้านั้น อัตราการขจัดเนื้องานจะมีค่าที่ค่อนข้างต่ำกว่าวิธีการขึ้นรูปแบบดั้งเดิมที่เห็นเศษชิ้นงานเช่น การกัด (milling) การกลึง (turning)

ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องาน

1. ค่ากระแสไฟฟ้า
2. ความถี่ของการปล่อยกระแสไฟฟ้า
3. ชนิดของอิเล็กโทรด
4. ชนิดของวัสดุชิ้นงาน
5. ประเภทของสารไดอิเล็กตริก

สมการการหา อัตราการขจัดเนื้องาน เป็นดังนี้

$$\text{อัตราการขจัดเนื้องาน} = \frac{\text{ปริมาตรที่ชิ้นงานถูกขจัดออกไป}}{\text{เวลาที่ใช้}} \quad \dots(2)$$

อัตราการขจัดเนื้องาน จะมีหน่วยเป็นปริมาณของเนื้อวัสดุชิ้นงานที่ถูกขจัดออกไปต่อหน่วยเวลา โดยในการทดลองจะใช้ปริมาณเนื้อวัสดุชิ้นงานเป็น ลูกบาศก์มิลลิเมตร และหน่วยเวลาเป็นนาที่ (ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อนาที่)

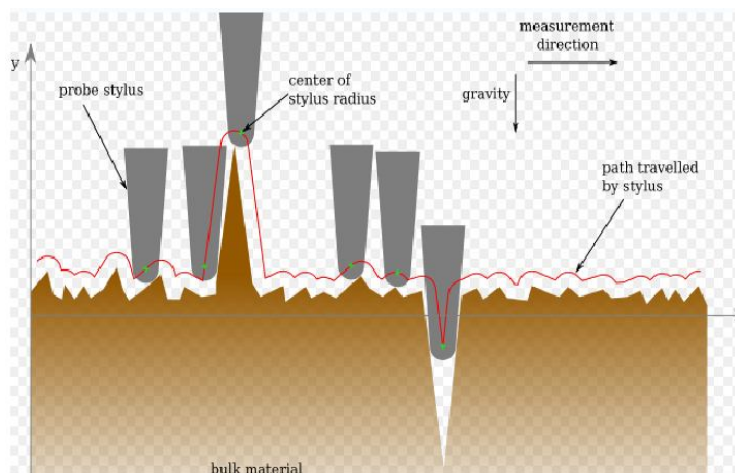
2.10 อัตราส่วนการสึกหรอของอิเล็กโทรด (Electrode Wear Ratio : EWR)

การสึกหรอของอิเล็กโทรดเกิดขึ้นระหว่างการกัดขึ้นงานด้วยไฟฟ้า ในการกัดขึ้นงานด้วยไฟฟ้าแต่ละครั้งจะก่อให้เกิด แอ่งทรงกลมเล็ก ๆ ที่ผิวขึ้นงาน นอกจากนี้ยังทำให้อิเล็กโทรดเกิดการสึกหรอ ทำให้รูปร่างของอิเล็กโทรดเปลี่ยนไป ซึ่งมีผลกระทบต่อความแม่นยำในการกัดขึ้นงาน ดังนั้น การสึกหรอของอิเล็กโทรดจึงเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญ อัตราการแปรรูปของขึ้นงานจะมีค่ามากกว่าอัตราส่วนการสึกหรอของอิเล็กโทรด ในกรณีที่อิเล็กโทรดเป็นโลหะอัตราส่วนการสึกหรอมีค่าประมาณ 1 ต่อ 3 ถ้าในกระบวนการมีการปล่อยกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น อิเล็กโทรดก็จะมี การสึกหรอเกิดขึ้นด้วย [Kalpakjial & Schmid, 2006] อัตราส่วนการสึกหรอของอิเล็กโทรดสามารถหาในรูปของ เปอร์เซ็นต์ได้จากสมการ ดังนี้

$$\text{อัตราส่วนการสึกหรอของอิเล็กโทรด} = \left[\frac{\text{ระยะที่อิเล็กโทรดสึกหรอออกไป}}{\text{ระดับความลึกบนขึ้นงานที่แท้จริง}} \right] \times 100 \quad \dots(3)$$

2.11 ความหยาบผิว (Surface roughness)

ความหยาบพื้นผิวเป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญทางวิศวกรรม ซึ่งพบว่ามีผลสำคัญต่อสมบัติทางด้านเคมี กายภาพ และทางกล อีกทั้งยังมีผลอย่างมากต่อสมบัติทางพื้นผิว (Tribology) ของวัสดุนั้น ๆ รวมถึงลักษณะความหยาบของพื้นผิวยังเป็นตัวบ่งชี้อายุการใช้งานของขึ้นงาน หรือขึ้นส่วนนั้น ๆ ได้อีกด้วย ตัวอย่างเช่น พื้นผิวที่ผ่านการขัดหยาบ (Grinding) ขัดละเอียด (Polishing) หรือผ่านการตัดแต่ง (Machining) ล้วนให้ค่าความหยาบของพื้นผิวที่แตกต่างกัน และ มีผลต่อการใช้งานโดยตรง ยกตัวอย่างเช่น ผิวงานที่เรียบมีแนวโน้มที่จะมีคุณสมบัติความล้าที่ดี ความหยาบของผิวขึ้นงานเป็นตัวแปรหนึ่งที่บ่งบอกถึงลักษณะพื้นผิวของขึ้นงานได้เป็นอย่างดี ซึ่งสามารถหาค่าได้จากระยะความสูงที่เบี่ยงเบนไปจากระดับอ้างอิง ค่าเบี่ยงเบนที่มาก หมายถึงพื้นผิวนั้นหยาบ ส่วนค่าเบี่ยงเบนที่น้อยกว่าหมายถึงพื้นผิวที่เรียบกว่านั่นเอง ในการวัดค่าความหยาบผิวของขึ้นงานจะใช้เครื่องมือ เซิร์ฟโคเดอร์ เอสอีซีดีสกีศูนย์ซี โดยลักษณะของความหยาบพื้นผิวนั้น จะได้จากการตามรอยการเคลื่อนที่ของหัวโพรบตามระยะทางพื้นผิวที่ต้องการ ดังแสดงในภาพที่ 2.4 ในขณะที่หัวโพรบเคลื่อนที่บนพื้นผิวจะมีการบันทึกระยะที่เปลี่ยนไปในแนวตั้งเทียบกับระยะอ้างอิง ซึ่งระยะทางที่ทำการวัด (Measurement length) อาจเป็นเส้นตรงหรือเป็นส่วนของเส้นโค้ง



ภาพที่ 2.4

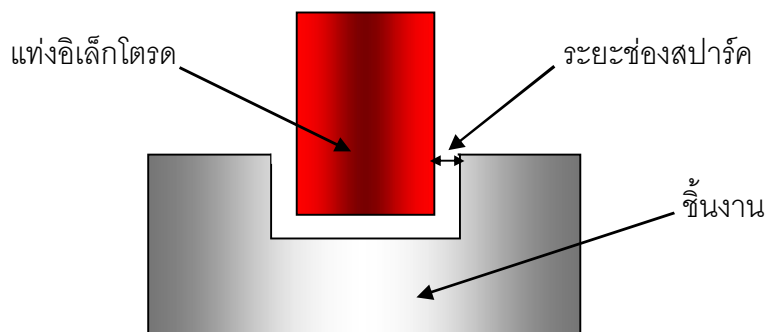
การลากผ่านของหัววัดบนพื้นผิวหน้าของชิ้นงาน

(ที่มา : http://en.wikipedia.org/wiki/File:Mechanical_filtering_of_surface_finish_trace.svg)

ตัวแปรที่ได้จากการวัดค่าความหยาบผิวนั้นมีหลายค่า เช่น R_a , R_z , R_q และ R_{ks} ซึ่งในแต่ละค่าจะเป็นการนำเอาข้อมูลต่าง ๆ ที่บันทึกได้ในขณะที่หัวโพรบเคลื่อนที่ มาประมวลให้เป็นตัวเลขค่าเดียว เพื่อสะดวกในการตีความและใช้งาน ตัวแปรที่ใช้มากที่สุด คือ ค่า R_a ซึ่งเป็นค่าที่แสดงค่าเฉลี่ยความหยาบพื้นผิว

2.12 ระยะช่องสปาร์ค (Gap)

ระยะช่องสปาร์คของชิ้นงานภายหลังการทดลอง คือ ครึ่งหนึ่งของขนาดความกว้างของหลุมที่เกิดจากการสปาร์ค ลบด้วยรัศมีของแท่งอิเล็กโทรด



ภาพที่ 2.5

ระยะของค่าช่องไฟในการสปาร์ค

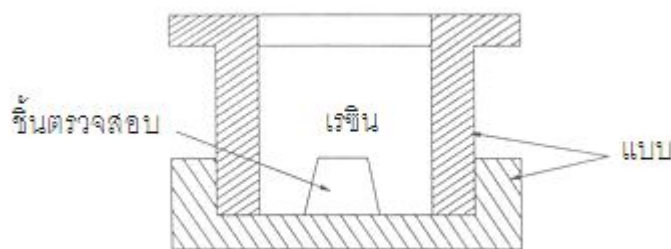
2.13 การวิเคราะห์ทางโลหะวิทยา

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะด้วยกล้องจุลทรรศน์

ชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคนั้น ควรตัดให้เกิดพื้นที่หน้าตัด และการตัดดังกล่าวต้องหลีกเลี่ยงให้เกิดความร้อนน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ทั้งนี้ก็เพราะว่าความร้อนดังกล่าวจะทำให้โครงสร้างที่ผิวหน้าตัดนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้การตรวจสอบนั้นเกิดข้อผิดพลาด

สำหรับขนาดของชิ้นงานตรวจสอบ ควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 25 มิลลิเมตร หรือ 1 นิ้ว และมีความสูงไม่น้อยกว่า 15 มิลลิเมตร แต่ถ้าเป็นทรงสี่เหลี่ยมควรมีขนาด 25 x 25 x 20 มิลลิเมตร ทั้งนี้ เพื่อให้การขัดผิวกระทำได้อย่างง่าย แต่ถ้าชิ้นงานตรวจสอบมีขนาดเล็กมากก็ควรหุ้มชิ้นงานด้วยเรซิน โดยให้หน้าตัดของชิ้นงานอยู่ภายนอกเรซิน และขนาดของเรซินนั้นก็ควรมีขนาดใกล้เคียงกับชิ้นงานตรวจสอบที่ได้กล่าวแล้ว ดังภาพที่ 2.6

หลังจากได้ชิ้นงานตรวจสอบที่มีขนาดตามต้องการแล้ว จะต้องดำเนินการขึ้นตอนต่อไป เพื่อให้สามารถนำชิ้นงานนั้นไปทำการตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ได้ ขั้นตอนในลำดับต่อไปนั้นจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



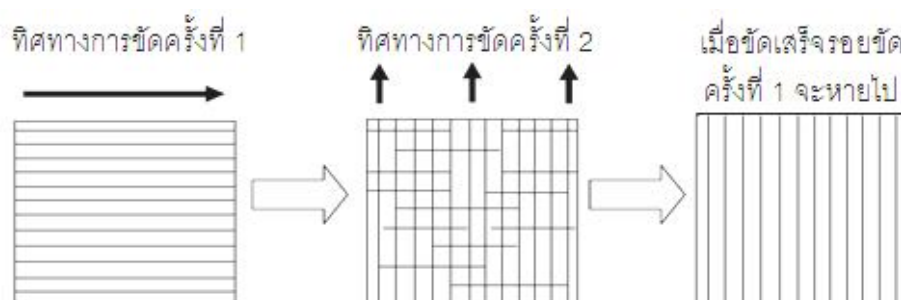
ภาพที่ 2.6

ลักษณะการหุ้มหินตรวจสอบด้วยเรซิน

(ที่มา : เอกสารอ้างอิง [เทพนรินทร์ ประพันธ์พัฒน์ และพิพัฒน์ สุจิตธรรมกุล, 2547])

การขัดผิวชิ้นงานตรวจสอบ (Grinding)

1. เริ่มต้นจากกระดาษทรายที่หยาบที่สุดก่อน (หมายเลขน้อย) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวิธีการตัดชิ้นงาน ถ้าตัดด้วยแรงเฉือนควรเริ่มจากเบอร์ 80 หากตัดด้วย แอบบราซีฟ คัท ออฟ วิล อาจเริ่มด้วยเบอร์ 240 หรือ 320 ได้เลย จากนั้น ขัดจนได้ชั้นพลาสติกดีฟอเมชันหมดไป และได้ผิวชิ้นงานเรียบ ด้าน และมีรอยขัดไปในทิศทางเดียวกัน มีความลึกสม่ำเสมอ
2. เปลี่ยนกระดาษทรายที่มีความหยาบมากขึ้นและขัดในทิศทางตั้งฉากกับรอยขัดเดิม การเพิ่มความละเอียดควรเพิ่มได้ระดับ ไม่ควรข้ามขั้นตอน ระหว่างขัดไม่ควรหมุนชิ้นงาน
3. ขัดไปจนถึงกระดาษทรายที่มีความละเอียดสูงที่สุด (โดยทั่วไปเบอร์ 800 หรือ 1200) ก่อนเปลี่ยนความละเอียดทุกครั้งควรได้รอยขัดไปในทิศทางเดียวกันและมีความลึกสม่ำเสมอ ไม่หลงเหลือรอยขัดจากกระดาษทรายเบอร์ก่อน



ภาพที่ 2.7

ลักษณะแนวทางการขัดชิ้นตรวจสอบสลับเป็นตาราง

(ที่มา : เอกสารอ้างอิง [เทพนรินทร์ ประพันธ์พัฒน์ และพิพัฒน์ สุจิตธรรมกุล, 2547])

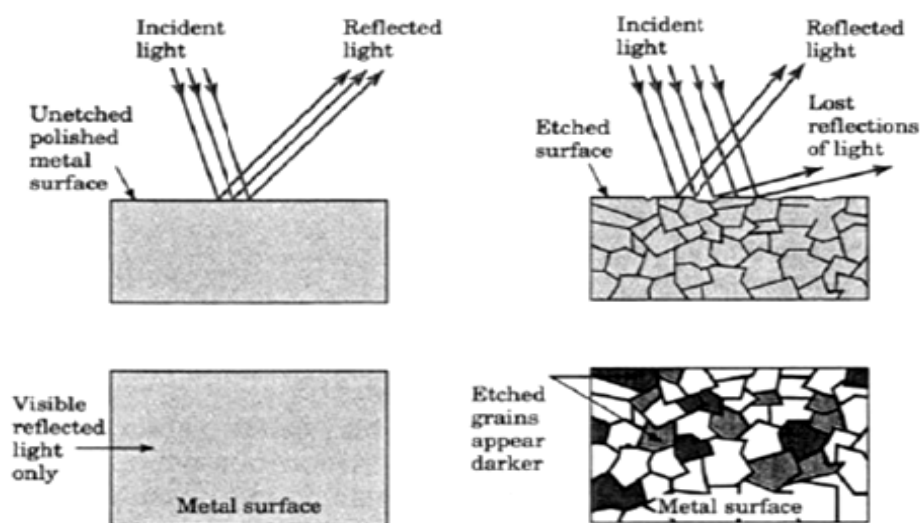
การขัดผิวด้วยผงขัด (Polishing)

1. การขัดละเอียด ทำบนผ้าขัดซึ่งมีขนที่เติมอนุภาคที่ใช้ในการขัดสี อนุภาคที่ใช้ส่วนใหญ่ ได้แก่ ผงอะลูมินา (Alumina Oxide) และแมกนีเซียม (Magnesium Oxide) หรืออาจจะใช้กากเพชรขัดผิวของชิ้นตรวจสอบที่มีความแข็งสูงมาก ซึ่งอนุภาคเหล่านี้มีขนาดละเอียดกว่าอนุภาคบนกระดาษทรายที่ใช้ในการขัดหยาบ
2. หลังจากทำความสะอาดชิ้นงานเสร็จแล้ว จึงนำชิ้นงานมาขัดละเอียด ในการขัดละเอียดควรหมุนชิ้นงาน ไม่ควรขัดในทิศทางเดียวกันตลอด ขัดจนลบรอยจากการขัดหยาบ
3. เปลี่ยนขนาดอนุภาคที่มีความละเอียดสูงขึ้น ขัดจนชิ้นงานไร้ริ้วรอยใดๆ
4. ล้างด้วยน้ำ เช็ดผิวชิ้นงานด้วยสำลีในกระแสน้ำ ล้างด้วยแอลกอฮอล์ เป่าแห้งด้วยไดร์เป่าผม

การกัดด้วยน้ำยา (Etching)

ชิ้นงานที่ถูกขัดจนเป็นมันแล้วนั้นจะต้องล้างด้วยแอลกอฮอล์ และควรผ่านการเป่าให้แห้งและปล่อยให้เย็นสู่อุณหภูมิห้อง จากนั้นจะถูกนำไปกัดด้วยน้ำยา ดังภาพที่ 2.8 ซึ่งจะเป็นน้ำยาอะไรนั้นต้องขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่ต้องการตรวจสอบ เช่น ถ้าเป็นเหล็กกล้าและเหล็กหล่อทั่วไปก็จะใช้กรดไนตริกร้อยละ 2 - 4 ผสมกับแอลกอฮอล์

1. เวลาในการกัดด้วยน้ำยา ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของน้ำยา และประเภทของชิ้นงานส่วนใหญ่ใช้การทดลองเพื่อหาเวลาที่เหมาะสม
2. หากกัดด้วยน้ำยานานเกินไปจะทำให้ได้โครงสร้างซึ่งจะส่องดูแล้วค่อนข้างมืดมองไม่เห็นความแตกต่างของเฟส (Overetched Microstructure)
3. หากการกัดด้วยน้ำยาสั้นเกินไปจะทำให้ได้โครงสร้างซึ่งจะค่อนข้างสว่างและไม่ชัด (Underetched Microstructure)
4. หลังจากการกัดด้วยน้ำยาเสร็จแล้ว ให้ล้างด้วยน้ำและแอลกอฮอล์แล้วเป่าให้แห้ง



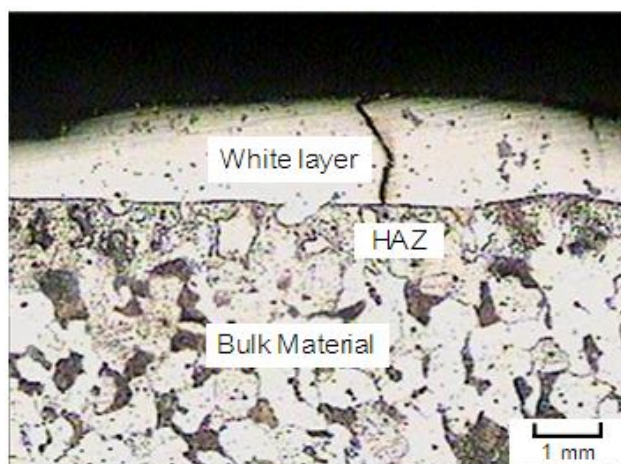
ภาพที่ 2.8

ลักษณะผิวชิ้นงานที่แสดงการสะท้อนของแสงจากกล้องจุลทรรศน์ ก่อนและหลังกัดด้วยน้ำยา

(ที่มา: Microstructure of materials, [http:// sut.ac.th/engineering/metal/pdf/](http://sut.ac.th/engineering/metal/pdf/))

2.14 ชั้นหลอมสีขาว (White layer) ที่เกิดจากการสปาร์ค

อิทธิพลจากการที่บริเวณผิวชิ้นงานได้รับความร้อนจากกระบวนการสปาร์ค ส่งผลทำให้อนุภาคของวัสดุชิ้นงานและอิเล็กโตรดถูกแยกออกมา ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส แล้วเกิดการหลอมละลายรวมตัวกันระหว่างอนุภาคของวัสดุทั้งสอง จากนั้นก็จะถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยของเหลวตัวกลาง จนกลายเป็นชั้นของแข็งปกคลุมอยู่บนผิวหน้าของชิ้นงาน ทำให้เกิดเป็นชั้นหลอมปกคลุมบนผิวหน้าของชิ้นงาน ซึ่งชั้นหลอมนี้จะมีลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างจากชิ้นงาน มีลักษณะเนื้อเป็นสีขาวเมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ ทำให้ถูกเรียกว่า “ชั้นหลอมสีขาว” [Ekmekci, 2007; Tung, 1998]



ภาพที่ 2.9

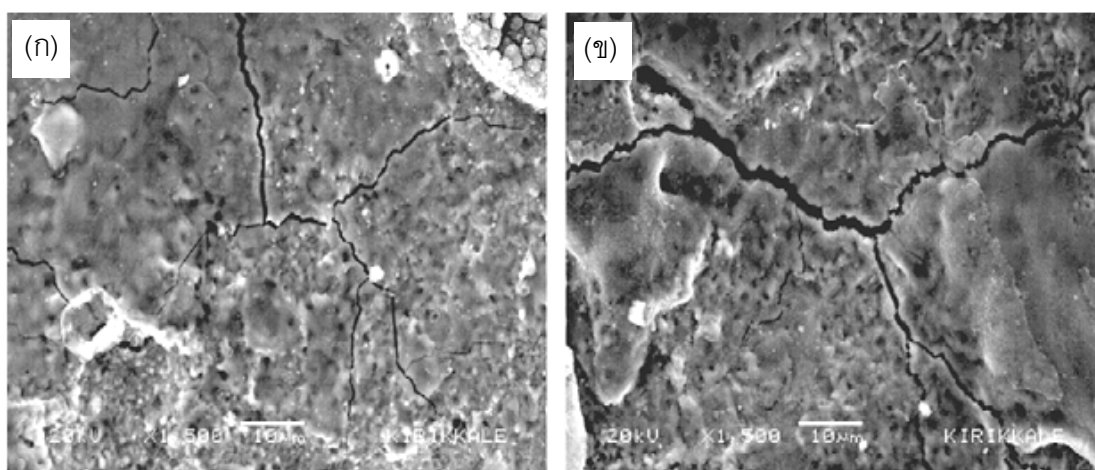
ลักษณะชั้นหลอมสีขาวและชั้นใต้ชั้นหลอมสีขาวที่เกิดจากการกัดเหล็กเพลอาขาว
(ที่มา : เอกสารอ้างอิง [สมมติ จินดาพล, 2553])

กระบวนการสปาร์ค มีอิทธิพลโดยตรงต่อโครงสร้างของชิ้นงาน ซึ่งสามารถแบ่งเป็นบริเวณที่ได้รับผลกระทบได้ดังนี้ คือ บริเวณชั้นหลอมสีขาว (White layer) บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนจากการสปาร์ค (Heat affect zone, HAZ) และวัสดุพื้นฐานที่ไม่ได้รับผลกระทบจากการสปาร์ค (Bulk materials) ดังภาพที่ 2.9 แสดงลักษณะชั้นหลอมสีขาวและชั้นใต้ชั้นหลอมสีขาวของเหล็กเพลอาขาวเมื่อผ่านกระบวนการสปาร์ค

2.15 รอยแตกร้าว (Cracks)

การแปรรูปด้วยเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า ชิ้นงานที่นำมาแปรรูปจะได้รับอิทธิพลจากความร้อนและถูกทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็วจากการฉีดสารไดอิเล็กตริก ดังนั้นจึงทำให้เกิดเป็นชั้นหลอมสีขาวบนผิวหน้าของชิ้นงาน ซึ่งบนผิวชิ้นงานนี้มักจะเกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็ก รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นจัดเป็นผลกระทบที่มีความสำคัญ เนื่องจากรอยแตกร้าวจะเป็นสาเหตุทำให้ชิ้นงานมีประสิทธิภาพลดลง รอยแตกร้าวนี้มีขนาดเล็กมาก ซึ่งไม่สามารถมองได้ด้วยตาเปล่า ต้องมองด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเท่านั้น รอยแตกร้าวจะมีผลถึงคุณสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานที่แปรรูปนั้น ๆ หน่วยการวัดของรอยแตกร้าวขนาดเล็กจะวัดเป็น จำนวนของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อตารางมิลลิเมตร ซึ่งเรียกว่า ความหนาแน่นของรอยแตกร้าว [O'Brien, Taylor, et al., 2003] ซึ่งหน่วยการวัดนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ คือ

1. จำนวนของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่ (Numerical crack density, Cr.Dn) โดยแสดงหน่วยเป็นจำนวนรอยแตกร้าวต่อตารางมิลลิเมตร
2. ความยาวรวมของรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อพื้นที่ (Surface crack density, Cr.S.Dn) โดยจะแสดงหน่วยเป็นไมโครเมตรต่อตารางมิลลิเมตร ($\mu\text{m}/\text{mm}^2$)
3. ความยาวเฉลี่ยของรอยแตกร้าวขนาดเล็ก (Mean crack Length, Cr.Le) ซึ่งหมายถึง ความยาวของรอยแตกร้าวขนาดเล็กเฉลี่ยในพื้นที่ที่ทำการตรวจสอบทั้งหมด โดยจะแสดงหน่วยเป็นไมโครเมตร (μm)



ภาพที่ 2.10

รอยแตกร้าวที่เกิดจากการกัดชิ้นงาน (ก) ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 6 แอมป์ เวลาเปิด 100 ไมโครวินาที
 (ข) ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 25 แอมป์ เวลาเปิด 100 ไมโครวินาที
 (ที่มา : เอกสารอ้างอิง [Hascalik, & Caydas, 2007])

2.16 ระบบอัลตราโซนิก (Ultrasonic)

หมายถึง คลื่นเสียงที่มีความถี่สูงเกินกว่าที่มนุษย์จะได้ยิน โดยทั่วไปแล้วหูของมนุษย์โดยเฉลี่ยจะได้ยินเสียงสูงถึงเพียงแค่ประมาณ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ เท่านั้น แต่พวกที่อายุน้อย ๆ อาจจะได้ยินเสียงที่มีความถี่สูงกว่านี้ได้ ดังนั้น โดยปกติแล้วคำว่าอัลตราโซนิกจึงมักจะหมายถึงคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ขึ้นไป จะสูงขึ้นจนถึงเท่าใดไม่ได้ระบุจำกัดเอาไว้

การมีทิศทางของคลื่นเสียงย่านอัลตราโซนิกทำให้นำไปใช้งานได้หลายอย่าง เช่น นำไปใช้ในเครื่องควบคุมระยะไกล (Ultrasonic remote control) เครื่องล้างอุปกรณ์ (Ultrasonic cleaner) โดยให้น้ำสั่นที่ความถี่สูง เครื่องวัดความลึก และทำแผนที่ใต้ท้องทะเล ใช้ทดสอบการรั่วไหลของท่อ หรือแม้กระทั่งนำไปใช้ในกระบวนการแปรรูปชิ้นงาน ไม่ว่าจะเป็น เซรามิกส์ แก้ว คาร์ไบด์ และโลหะ เป็นต้น โดยความถี่ที่ใช้ขึ้นอยู่กับการใช้งาน

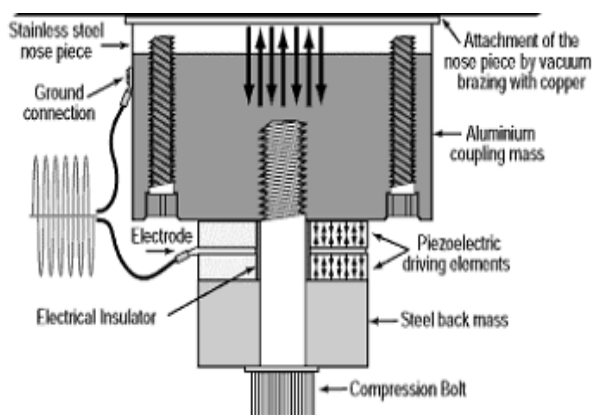
อุปกรณ์ที่สามารถแปลงพลังงานในรูปอื่นให้มาเป็นพลังงานทางกลโดยการสั่นไปมา ซึ่งทำให้เกิดคลื่นเสียงย่านอัลตราโซนิกกระจายไปในอากาศได้หรือแปลงพลังงานทางกลให้มาเป็นพลังงานในรูปอื่นได้นั้น มีชื่อเรียกว่า อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ (Ultrasonic Transducer) ในปัจจุบันอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์มีหลายแบบขึ้นอยู่กับหลักการที่ใช้ แบบที่นิยมใช้กันมากได้แก่

แบบพีโซอิเล็กทริก (Piezo-electric Transducer) ซึ่งแปลงไปมาระหว่างพลังงานไฟฟ้าและพลังงานทางกล โดยมีความถี่เรโซแนนซ์คงที่ค่าหนึ่ง

แบบแมกนีโตสตริกทีฟ (Magnetostriuctive Transducer) ซึ่งแปลงไปมาระหว่างพลังงานไฟฟ้าในขดลวดกับตำแหน่งความยาวของแกนเหล็กที่สวมขดลวดนั้นอยู่

ทรานสดิวเซอร์แบบพีโซอิเล็กทริก (Piezoelectric transducer)

พีโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นพลังงานกลโดยตรง โดยการใช้พีโซอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ ซึ่งเป็นการทำให้วัสดุบางชนิดเปลี่ยนแปลงขนาด และเกิดการสั่นสะเทือนขึ้น โดยการปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านวัสดุนั้น พลังงานไฟฟ้าความถี่สูงระดับอัลตราโซนิก จะถูกส่งจากเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าไปสู่พีโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ และอุปกรณ์ภายในทรานสดิวเซอร์ จะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าความถี่สูงที่ได้รับไปเป็นการสั่นสะเทือน

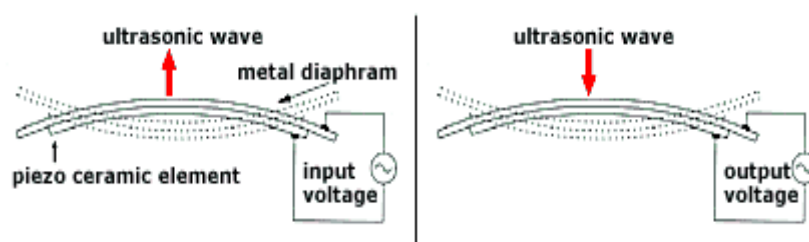


ภาพที่ 2.11

พีโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์

(ที่มา : เอกสารอ้างอิง [ศิริโรจน์ เกตุแก้ว, 2007])

ภายในตัวอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์แบบพีโซอิเล็กทริก แบบที่มีใช้กันในปัจจุบัน ซึ่งได้รับการพัฒนามาในระดับหนึ่งแล้ว จะประกอบด้วยชั้นสารเซรามิกสสี่เหลี่ยม ซึ่งมีผิวโลหะเงินฉาบอยู่ทั้ง 2 หน้า เพื่อให้ต่อสายไฟออกมาเป็นขา 2 ขา ชั้นสารเซรามิกสนี้ประกอบขึ้นจากสารเซรามิกส 2 ชั้น ประกบกันอยู่โดยวางให้ขั้วไดโพลทางไฟฟ้าภายในอะตอมของมันเป็นทิศทางตรงข้ามกัน



ภาพที่ 2.12

ชั้นสารเซรามิกสโก่งงอไปมาทำให้เกิดคลื่นเสียงอัลตราโซนิกกระจายไปในอากาศ

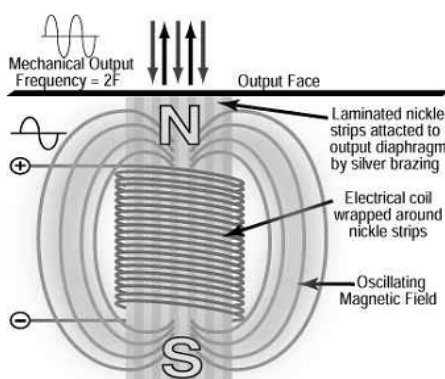
(ที่มา : http://th.farnell.com/jsp/bespoke/bespoke7.jsp?bespokepage=farnell/en/ed_world/products/new/2005/wk9/midas_sensing.jsp)

เมื่อมีสัญญาณแรงดันมาตกคร่อมขั้วทั้งสองของเซ็นเซอร์เซรามิกส์ จะทำให้เซ็นเซอร์โก่งออกมาหรือน้อยหรือในทิศทางใดตามขนาดและทิศทางการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณนั้น ๆ ทำให้เกิดการกดอัดอากาศโดยรอบเกิดเป็นคลื่นเสียงที่มีความถี่เดียวกับสัญญาณนั้นออกไป

ทรานสดิวเซอร์แบบแมกนีโตสตริกทีฟ (Magnetostriictive Transducer)

วิธีการที่เรียกว่าแมกนีโตสตริกชัน โดยการนำวัสดุบางชนิดไปวางในสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากระแสสลับ วัสดุจะขยายและหดตัวทำให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้น พลังงานไฟฟ้ากระแสสลับจากเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า จะถูกส่งเข้าสู่ทรานสดิวเซอร์ผ่านทางขดลวด ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากระแสสลับขึ้น และสนามแม่เหล็กนี้จะเหนี่ยวนำให้แท่งนิเกิล หรือวัสดุประเภทแมกนีโตสตริกทีฟอื่น ๆ ให้เกิดการสั่นสะเทือนที่มีความถี่สูงระดับอัลตราโซนิก

เนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องขนาดของอุปกรณ์รวมทั้งความสลับซับซ้อนในการทำงานของกระแสไฟฟ้าและแม่เหล็ก ทำให้แมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์ แทบจะไม่ได้ถูกนำไปใช้ในงานที่ต้องการความถี่สูงเกิน 20 กิโลเฮิร์ตซ์เลย แต่ในทางกลับกัน พิโซอิเล็กตริกทรานสดิวเซอร์สามารถใช้งานได้ดีสำหรับงานที่ต้องการความถี่สูงระดับเมกะเฮิร์ตซ์ โดยทั่วไปแมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์จะมีประสิทธิภาพต่ำกว่าพิโซอิเล็กตริกทรานสดิวเซอร์ ด้วยเหตุผลจากหลักความจริงที่ว่า แมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์ต้องเปลี่ยนพลังงานถึง 2 ทอด คือ เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานแม่เหล็ก และเปลี่ยนพลังงานแม่เหล็กไปเป็นพลังงานกลอีกทีหนึ่ง ดังนั้นจึงเกิดการสูญเสียประสิทธิภาพในแต่ละครั้งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงาน



ภาพที่ 2.13

แมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์

(ที่มา : เอกสารอ้างอิง [ศิริโรจน์ เกตุแก้ว, 2007])

2.17 เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic Machining : USM)

ในกระบวนการอัลตราโซนิก เป็นการใช้คลื่นไฟฟ้าที่มีความถี่ต่ำ ถูกประยุกต์ใช้กับทรานสดิวเซอร์ ซึ่งเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นแรงสั่นทางกลที่มีความถี่สูง ประมาณ 20 กิโลเฮิรตซ์ [Thoe, Aspinwall, & Wise, 1998] พลังงานทางกลนี้ถูกส่งผ่านฮอว์นและชุดเครื่องมือ ส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนของชุดเครื่องมือที่มีความถี่อัลตราโซนิก เพื่อส่งต่อกำลังไปยังวัสดุที่กัดกร่อน ซึ่งอยู่ในสภาพที่เป็นสารละลายผสมผงขัด (Slurry) ผงขัดที่ผสมอยู่ในสารละลายนี้ จะมีคมตัดซึ่งจะถูกส่งไปขัดสีกับผิวชิ้นงานให้ส่วนดังกล่าวหลุดออกไปได้ [Moreland, 1991] ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีลักษณะเหมือนกับชุดเครื่องมือในทิศทางตรงกันข้าม โดยที่ชิ้นงานและชุดเครื่องมือจะไม่สัมผัสกัน จะเกิดการสัมผัสกันเฉพาะผงขัดกับชิ้นงานเท่านั้น [Guzzo, Shinohara, & Raslan, 2004]

การไหลที่คงที่ของสารละลายผสมผงขัดระหว่างชุดเครื่องมือกับชิ้นงาน โดยทั่วไปสารละลายปกตินั้นประกอบไปด้วยผงขัดที่เป็นอนุภาคเล็ก ๆ เช่น เพชร, โบรอนคาร์ไบด์, ซิลิคอนคาร์ไบด์ และอลูมินา ซึ่งผงขุดนั้นจะแขวนลอยอยู่ในน้ำหรือสารละลายเคมีที่เหมาะสม นอกจากนั้นสารละลายที่ผสมผงขัดที่ใช้สำหรับการขจัดเนื้อชิ้นงาน ยังเป็นตัวที่ช่วยฉีดไล่เศษของชิ้นงานที่เกิดจากการกัดด้วยการสั่นของชุดเครื่องมือ และจะทำงานร่วมกันกับสารละลายผสมผงขัด ซึ่งช่วยกัดชิ้นงานให้ได้รูปร่างออกมาตามลักษณะของชุดเครื่องมือ



ภาพที่ 2.14

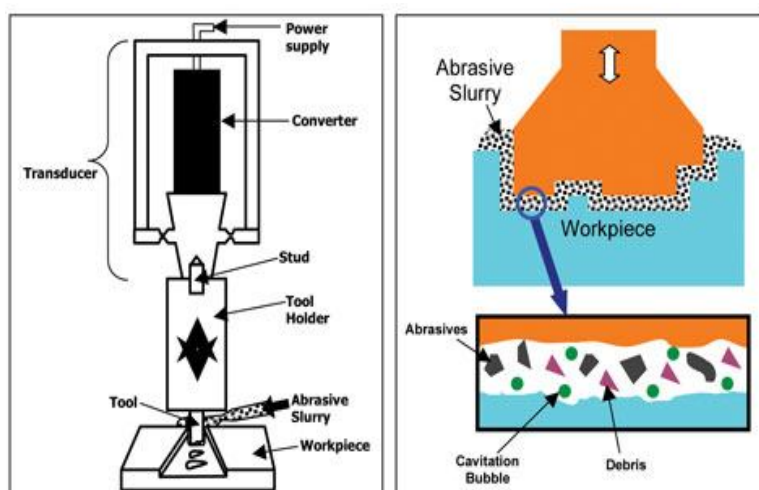
เครื่องอัลตราโซนิก

(ที่มา : SonicMill®, www.sonicmill.com)

กระบวนการอัลตราโซนิก เป็นกระบวนการที่ปล่อยสารละลายที่ผสมผงขัดไปใช้ในกระบวนการขัดแกะ ซึ่งจะไม่ใช่พลังงานทางความร้อนและใช้แรงน้อยมาก ดังนั้น จึงสามารถช่วยลดการทำลายผิวหน้าของวัสดุให้น้อยลงได้ในระหว่างการกัดวัสดุ นอกจากนี้ยังช่วยลดการเกิดความเค้นตกค้าง (Residual Stress) ที่อาจจะเกิดที่ผิวชิ้นงานได้ [Singh, & Khamba, 2005]

กระบวนการอัลตราโซนิกสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลไก ดังนี้

1. กระบวนการกัดชิ้นงานโดยใช้การกัดโดยตรงระหว่างอนุภาคผงขัดกับชิ้นงาน
2. การกัดกร่อนแบบคาวิเทชัน
3. เศษชิ้นส่วนขนาดเล็กจะถูกกำจัดออก โดยการไหลผ่านของสารละลายผสมผงขัด



ภาพที่ 2.15

ส่วนประกอบเครื่องอัลตราโซนิกและการทำงานของชุดเครื่องมือ

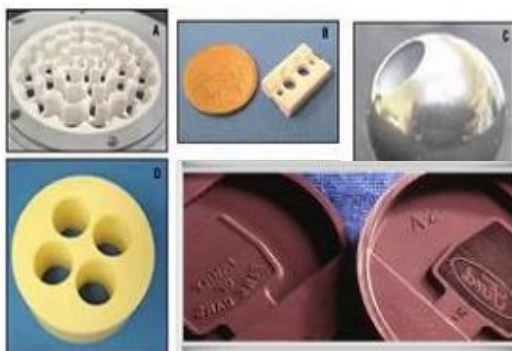
และสารละลายผสมผงขัด

(ที่มา : Applegate Directory Ltd., www.ceramicindustry.com)

อัตราการขจัดเนื้องานและความขรุขระของผิวหน้าชิ้นงานขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุ และปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการ ประกอบไปด้วย ชนิด, ขนาดของผงขัด, ค่าแอมพลิจูดของการสั่น, ความพรุนของวัสดุ, ค่าความแข็ง (Hardness) และความเหนียว (Toughness) โดยทั่วไป อัตราการขจัดเนื้องาน จะมีค่าต่ำสำหรับวัสดุที่มีค่าความแข็งและโครงสร้างที่มีความเหนียวสูงมาก

ประโยชน์ของกรรมวิธีการขัดแคะด้วยคลื่นความถี่อัลตราโซนิก

- เหมาะสำหรับวัสดุแข็งและเปราะ เช่น เซรามิกส์, แก้ว และคาร์ไบด์ [Yu, Hu, & Rajurkar, 2006]
- นอกจากนั้นยังเหมาะสำหรับโลหะด้วย เช่น เหล็กไร้สนิม และไทเทเนียม
- นำไปใช้ผลิตรูในลักษณะต่าง ๆ ได้ ทั้งที่เป็นรูกลมหรือรูปร่างอื่น ๆ หรือแม้กระทั่งการเจาะรูบนผิวชิ้นงานไม่เรียบได้
- ใช้ในกรรมวิธีคล้าย ๆ การทำเหรียญ (Coining Operations) ซึ่งเป็นกระบวนการถ่ายทอดรูปแบบหรือลวดลายจากแม่พิมพ์ลงไปสู่ชิ้นงานได้



ภาพที่ 2.16

ชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการอัลตราโซนิก

(ที่มา : Advanced Machining Processes, <http://it.doi.eng.cmu.ac.th/~wassanai/Manu/NTM.pdf>)

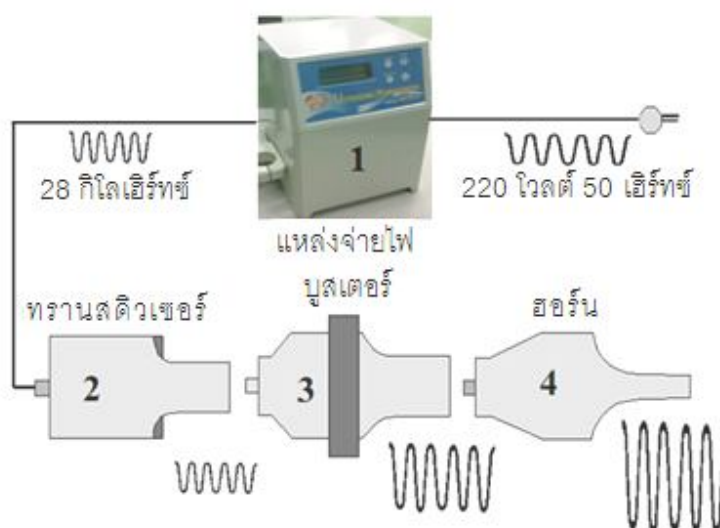
2.18 กระบวนการสปาร์คร่วมกับการใช้คลื่นอัลตราโซนิก (EDM combined with Ultrasonic Vibration : EDM/USV)

เป็นการประยุกต์โดยการทำให้อิเล็กโตรดสั่นด้วยคลื่นความถี่อัลตราโซนิก ซึ่งก็เป็นอีกวิธีที่กำลังได้รับความสนใจ และถูกนำมาใช้เพิ่มประสิทธิภาพให้กับเครื่องจักรที่ใช้งานกับวัสดุที่ยากต่อการแปรรูป ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น ได้จากการสั่นด้วยคลื่นความถี่อัลตราโซนิก ซึ่งจะทำให้เกิดกระบวนการควิเตชัน ซึ่งเป็นกระบวนการที่กลุ่มก๊าซเล็ก ๆ ที่อยู่ระหว่างบริเวณอิเล็กโตรดกับชิ้นงานเกิดการสั่น ถูกบีบอัดและรวมตัวกันเป็นฟองอากาศขนาดใหญ่แล้วเกิดการแตกตัว พลังงานการแตกตัวนี้จะทำให้บริเวณผิวหน้าชิ้นงานเกิดการแตกตัว ขาดและหลุดออก โดยมีผงขัดเข้ามาช่วยในการขจัดเนื้องานและช่วยลดความหยابผิวที่จะเกิดขึ้น [Mingrang, et al., 2007]

กระบวนการกัดโลหะด้วยไฟฟ้ามีข้อดีในการกัดชิ้นงานด้วยวัสดุที่มีรูปร่างพิเศษหรือกัดวัสดุที่มีความแข็ง เช่น แม่พิมพ์พลาสติก, แม่พิมพ์โลหะ, วัสดุคาร์ไบด์ และวัสดุทางด้านวิศวกรรม [Ho, & Newman, 2003] ทั้งที่กระบวนการสปาร์คนั้นถูกใช้อย่างกว้างขวางในด้านวิศวกรรมการผลิต แต่ก็ยังมีข้อเสียอยู่ โดยหนึ่งในข้อเสียที่สำคัญนั่นก็คือ ประสิทธิภาพการแปรรูปของการสปาร์คมีค่าต่ำ และค่าความหยาบของพื้นผิวของชิ้นงานมีค่ามาก [Wang et al., 2002, Songmei, & Wansheng, 1998] ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้จึงได้มีการนำกระบวนการอัลตราโซนิกเข้ามาเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับกระบวนการกัดโลหะด้วยไฟฟ้า

2.18.1 การส่งผ่านคลื่นความถี่อัลตราโซนิก ในกระบวนการสปาร์คร่วมกับการใช้คลื่นอัลตราโซนิก

การส่งผ่านคลื่นเสียงความถี่สูงเข้าสู่บริเวณช่องว่าง (Gap) ระหว่างชิ้นงานและอิเล็กโทรดด้วยเครื่องกำเนิดความถี่อัลตราโซนิก มีส่วนประกอบหลักอยู่ 4 ส่วน ดังนี้ ส่วนที่ 1 คือ แหล่งจ่ายไฟ ทำหน้าที่แปลงสัญญาณไฟฟ้าที่ความถี่ 50 เฮิรท์ ให้มีสัญญาณความถี่อยู่ในระดับ 28 กิโลเฮิรท์ ส่งผ่านไปยังส่วนที่ 2 เรียกว่า ตัวแปลงสัญญาณหรือทรานสดิวเซอร์ ทำหน้าที่ในการแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล ส่งออกมาในรูปแบบของการสั่นสะเทือนเชิงกล ส่งผ่านส่วนที่ 3 เรียกว่า บูสเตอร์ (Booster) ทำหน้าที่ขยายหรือลดสัญญาณ และส่งผ่านส่วนที่ 4 เรียกว่า ฮอ์น (Horn) ทำหน้าที่ส่งผ่านคลื่นความถี่อัลตราโซนิกไปใช้งาน [Jianxin, & Taichiu, 2001]

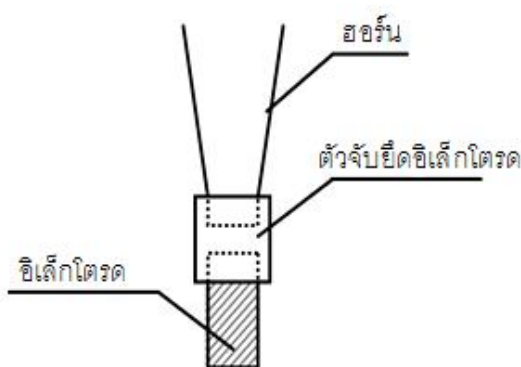


ภาพที่ 2.17

ส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดคลื่นความถี่อัลตราโซนิก
(ที่มา : เอกสารอ้างอิง [นรินทร์ อินตะวงค์และคณะ, 2550])

2.18.2 หลักการและการติดตั้งอุปกรณ์ (Principle and Setup)

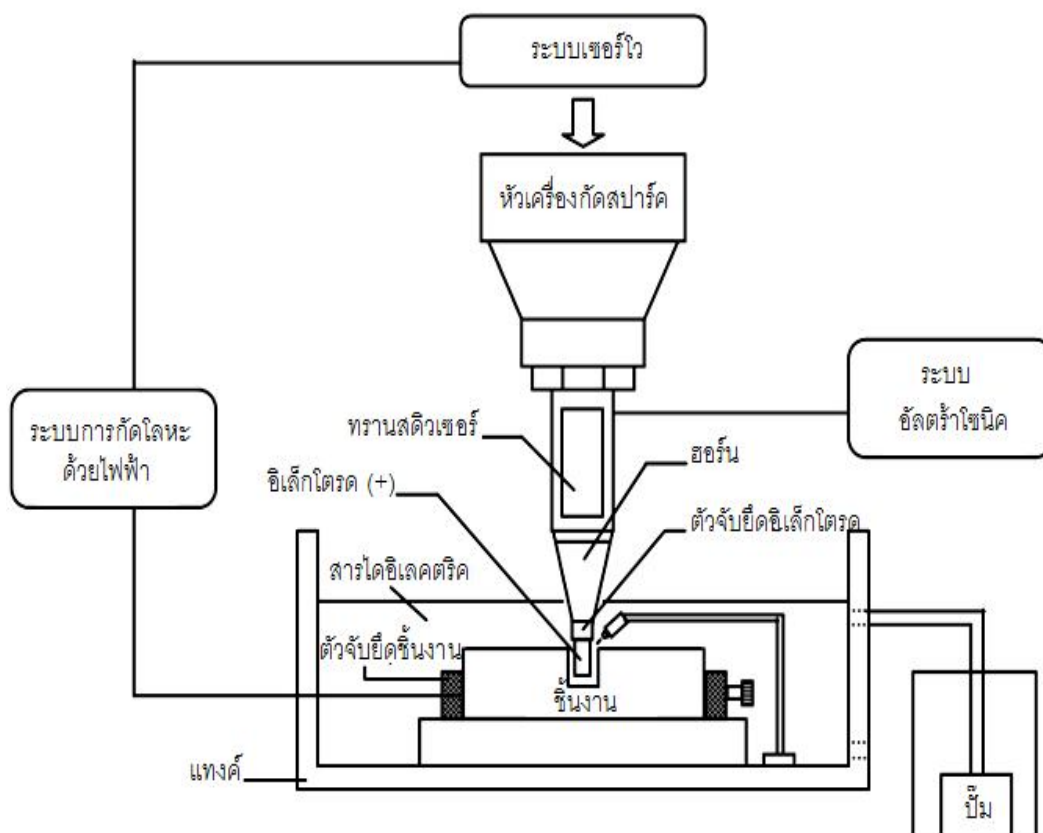
- ชิ้นงานและอิเล็กโทรด จะถูกติดตั้งหรือเชื่อมต่อกับขั้วแคโทด (Cathode) และแอโนด (Anode) ของระบบการกัดโลหะด้วยไฟฟ้าร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิกตามลำดับ
- ตัวจับยึดอิเล็กโทรด (Insulating Holder) จะเป็นตัวที่ช่วยจับยึดระหว่างแท่งอิเล็กโทรดและหัวของอัลตราโซนิกเข้าด้วยกัน และนอกจากนี้ยังมีหน้าที่ป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าไปยังส่วนของหัวอัลตราโซนิก



ภาพที่ 2.18

ตัวจับยึดอิเล็กโทรด

- สารไดอิเล็กตริกจะไหลออกจาก ท่อที่ต่อออกจากแท่งสารไดอิเล็กตริกภายใต้แรงดันของปั๊ม
- สารไดอิเล็กตริกที่มีความดันสูงจะไหลพุ่งออกจากหัวฉีดด้วยแรงดันสูงผ่านไปยังช่องว่าง (Gap) ระหว่างอิเล็กโทรดและชิ้นงาน เมื่อสารไดอิเล็กตริกผ่านการใช้งานไปแล้ว จะมีระบบรีไซเคิลคอยดูดเอาผงขัด เพื่อนำกลับมาใช้ในกระบวนการอีกครั้ง
- อิเล็กโทรดจะเกิดการสั่นด้วยกำลังที่ส่งผ่านมาจากทรานสดิวเซอร์ มายังฮอ์น (Horn) ด้วยความถี่อัลตราโซนิกประมาณ 28 กิโลเฮิร์ตซ์
- ระบบเซอร์โว (Servo system) ถูกใช้เพื่อควบคุมระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดและชิ้นงาน และควบคุมการป้อนอิเล็กโทรด



ภาพที่ 2.19

การติดตั้งระบบและอุปกรณ์ต่างๆ
ของกระบวนการกัดโลหะด้วยไฟฟ้าร่วมกับการใช้คลื่นอัลตราโซนิก

2.19 บรรณกรรมปริทรรศน์

2.19.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการนำการสั่นด้วยคลื่นความถี่อัลตราโซนิก (Ultrasonic Vibration) มาใช้ร่วมกับกระบวนการกัดโลหะด้วยไฟฟ้า (EDM)

Mingrang และคณะ [Mingrang, et al., 2007] ทำการศึกษาค้นคว้าและได้พบว่า กระบวนการกัดโลหะด้วยไฟฟ้า มีข้อเสียหลัก ๆ อยู่สองอย่าง คือ อัตราการขจัดเนื้องานมีค่าต่ำ และ พื้นผิวที่เกิดจากการกัดด้วยไฟฟ้านั้นมีค่าความหยาบผิวไม่ดี ดังนั้นจึงได้มีการตั้งสมมุติฐานและทำการทดลองขึ้น ซึ่งพบว่าการกัดสปาร์คด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Vibration Electrical Discharge Machining : UEDM) นั้น สามารถเพิ่มอัตราการขจัดเนื้องานในการกัดสปาร์คที่มีขนาดเล็ก ในการทดลองจะใช้เครื่องเจาะขนาดเล็กที่ปล่อยอิเล็กตรอนความเร็วสูง (D703F)

ด้วยการสั่นของอิเล็กโทรด กระบวนการกัดสปาร์คด้วยความถี่อัลตราโซนิกนั้นจึงจะประสบผลสำเร็จ การทำการทดลองนี้จะเปรียบเทียบอัตราการขจัดเนื้องาน และความหยาบผิว ซึ่งจะสมบูรณ์ได้นั้น ขึ้นอยู่กับตัวแปรทางไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ได้แก่ ค่ากระแสไฟฟ้า พัลส์ดีวเรชั่น และความแตกต่างกันของอิเล็กโทรด ผลที่ได้ก็คือ อัตราการขจัดเนื้องานจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น และค่าความหยาบผิวลดลง

AbdullahและMohamma [Abdullah, &Mohamma, 2009] ศึกษาถึงผลกระทบของการสั่นด้วยความถี่อัลตราโซนิกของอิเล็กโทรด (Ultrasonic Vibration Electrode) บนพื้นผิวของ ทังสเตนคาร์ไบด์ (WC-10%Co). ในการสปาร์ค ซึ่งพบว่าความสมบูรณ์ของพื้นผิวนั้นขึ้นอยู่กับความผันแปรของกระบวนการผลิตรวมถึงพื้นผิวหน้าของโลหะ การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกล ทางเคมี เช่น รอยแตกร้าวบนพื้นผิวชิ้นงาน งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงพื้นผิวที่เกิดจากการสปาร์ค ขนาด และจำนวนรอยแตกในชิ้นผิวชิ้นงาน ความหนาของชั้นความแข็ง และตัวแปรที่ทำให้ชั้นของพื้นผิวไม่สมบูรณ์ การใช้อัลตราโซนิกเข้ามาช่วยในกระบวนการสปาร์ค ส่งผลให้ความเค้นที่ได้น้อยและ รอยร้าวบนผิวชิ้นงานน้อยด้วย

Yan [Yan, 2001] ได้ใช้เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพพื้นผิวของอลูมิเนียมอัลลอย (AL-Zn-Mg) กับการใช้กระบวนการอัลตราโซนิก (USM) เข้ามาช่วยในการสปาร์ค โดยในการทดลองจะเลือกใช้ ผงอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) ผสมร่วมกับของเหลวไดอิเล็กตริกเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาสารละลายของแข็งเติมลงในชิ้นผิวโดยใช้ระยะเวลาเพียงสั้น ๆ พิจารณาลักษณะพื้นผิวของอลูมิเนียมอัลลอยและวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่เติมลงในของเหลวไดอิเล็กตริกโดย Electron Probe Micro-Analyzer (EPMA) ที่แสดงถึงความหนาของชั้นผิวและปริมาณการแพร่ซึมของซิลิกา และคาร์บอน ในบริเวณของการสปาร์คชิ้นงาน ซึ่งในการประยุกต์ใช้กระบวนการอัลตราโซนิกกับการกัดโลหะด้วยไฟฟ้านั้น สามารถที่จะปรับปรุงพื้นผิว กระบวนการเกิดซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีโครงสร้างแบบอลูมิเนียม-ซิลิกา (AL-Si) ในชิ้นผิวชิ้นงาน ซึ่งทำให้เกิดความแข็งแรงที่พื้นผิวและใช้ระยะเวลาที่สั้นในการปรับปรุงพื้นผิวชิ้นงาน

Sundaramและคณะ [Sundaram, Pavalajaran, & Rajurkar, 2008] ทำการศึกษา ค้นคว้าหาตัวแปรของวิธีการอัลตราโซนิกคร่อมด้วยไมโครสปาร์คโดยวิธีการของทางสถิติ ซึ่งวิธีการนี้จะดำเนินการโดย ใช้การสั่นของคลื่นอัลตราโซนิกกับชิ้นงาน ออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีทางสถิติ เพื่อใช้ในการหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้ได้อัตราการขจัดเนื้องานมากที่สุด และมีอัตราส่วนการสึกหรอของอิเล็กโทรดน้อยที่สุด จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยวิธีอินวา (ANOVA) และอัตราส่วนสัญญาณไปยังสิ่งรบกวน (Signal to noise, S/N ratio) ถูกนำมาใช้เพื่อหาค่าตัวแปรที่สำคัญ จากการใช้อินวาในการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่า การสั่นของคลื่น

อัลตราโซนิก ที่ 60% ที่กำลังสูงสุดด้วย Capacitance 3300 PF จะทำให้ได้อัตราการขจัดเนื้องานที่ดีที่สุด เวลาในการทำงานของเครื่องจักรจะเป็นตัวที่มีบทบาทสำคัญในการสึกหรอของอิเล็กโทรด

Zhixin และคณะ [Zhixin, Jianhua, & Xing, 1995] ได้ทำการศึกษาและได้นำเทคนิคใหม่ที่เรียกว่า Ultrasonic vibration pulse electro-discharge machining (UVPEDM) เข้ามาใช้ซึ่งเทคนิคนี้ ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการผลิตรูในวิศวกรรมเซรามิกส์ หลักการของ UVPEDM ถูกอธิบายในงานวิจัยในครั้งนี้ การสั่นด้วยคลื่นความถี่อัลตราโซนิกของอิเล็กโทรด มีผลทำให้เกิดพัลส์ดีสชาร์จ ใน UVPEDM ซึ่งจะแทนที่ Special Pulse Generator ใน Traditional Electro-discharge Machining Ultrasonic Vibration ของอิเล็กโทรด และนอกจากนี้ยังทำให้เกิด Gap-Flushing ด้วย จากการทดลองโดยใช้เทคนิคใหม่นี้ ทำให้งานที่ได้มีประสิทธิภาพและสามารถเพิ่มอัตราการขจัดเนื้องานให้สูงขึ้นได้

2.19.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการผสมผงอนุภาคในสารไดอิเล็กตริกในกระบวนการกัดโลหะด้วยไฟฟ้า

Peças' และ Henriques [Peças', & Henriques, 2003] ทำการศึกษาการใช้ผงอนุภาคซิลิกาผสมในของเหลวไดอิเล็กตริกในการปรับปรุงพื้นผิวชิ้นงานโดยใช้กรรมวิธีการกัดโลหะด้วยไฟฟ้า การวัดผลงานด้วยคุณภาพของพื้นผิวงานและเวลาการดำเนินการในกระบวนการ ผลของการทดลองนั้นเป็นไปได้ในทางบวก ผงอนุภาคซิลิกาที่ใช้ผสมลงในของเหลวไดอิเล็กตริกนั้นสามารถลดเวลาการทำงาน ลดความหยาบของผิวชิ้นงานและรอยแตกกราวที่เกิดขึ้นได้

Singh [Singh, 2008] ในงานวิจัยนี้ได้กล่าวถึง ผลจากการทดลองเกี่ยวกับกระบวนการกัดโลหะด้วยไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการผสมผงอนุภาคลงในของเหลวไดอิเล็กตริก เพื่อทำการสปาร์ชิ้นงานที่เป็นวัสดุเจือ เกรด 6061Al/Al₂O₃P/20p อิเล็กโทรดทองแดง ผงอนุภาคที่ใช้เป็นซิลิคอนคาร์ไบด์ โดยศึกษาถึงประสิทธิภาพของกระบวนการที่ส่งผลต่อผิวและความหยาบของผิวชิ้นงานที่มาจากตัวแปรที่ดีที่สุดที่ใช้ในกระบวนการ นั่นคือขนาดของผงอนุภาค การรวมตัวหรือการกระจายตัวของผงอนุภาค และช่วงของกระแสไฟฟ้า (Pulse Current) ซึ่งทั้งหมดจะส่งผลกระทบต่อพื้นผิวบนชิ้นงาน

Marek และ Jerzy [Marek, & Jerzy] งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการสปาร์คโดยประยุกต์ใช้เทคนิคการผสมผงอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์ในของเหลวไดอิเล็กตริก และทำการสปาร์คชิ้นงานเพื่อการปรับปรุงคุณภาพผิวของเครื่องมือตัดโดยการใช้ลักษณะพิเศษของไฮโดรคาร์บอนจากของเหลวไดอิเล็กตริก รวมตัวกับอะตอมประจุบวกและอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์ ซึ่งผลการทดลองในการผสมผงซิลิคอนคาร์ไบด์ในของเหลวไดอิเล็กตริก พบว่า สามารถ

ลดความหยาบของพื้นผิว ขนาดของเกรนและปริมาณส่วนผสมที่ไม่เท่ากัน หรือแตกต่างกัน จะส่งผลให้เกิดความแตกต่างของกระแสไฟฟ้า และเป็นผลทำให้ความหยาบของผิวชิ้นงาน ไม่เท่ากัน จากผลการทดลอง ความหยาบผิวที่แตกต่างกัน เป็นผลมาจากขนาดของผงอนุภาคที่มี ขนาดไม่เท่ากัน สรุปได้ว่า ขนาดของผงอนุภาคหรือขนาดของเกรนมีผลต่อกระบวนการ ของพัลส์ดีวีเรชั่น ในการใช้ผงอนุภาคผสมลงในของเหลวไดอิเล็กตริก ซึ่งจะทำให้ความหยาบผิว ลดลงเมื่อใช้ผงอนุภาคผสมลงไปปริมาณที่มากและขนาดของเกรนที่ละเอียด อย่างไรก็ตาม ในการเลือกใช้และตัดสินใจในการใช้งานนั้น ต้องนึกถึงเรื่องของต้นทุนด้วย

KuangและJenn (Kuang, &Jenn, 2007) ศึกษาเกี่ยวกับการใช้ผงโลหะ ในกระบวนการกัดโลหะด้วยไฟฟ้ากับชิ้นงานโลหะ โคบอลต์-ทังสเตนคาร์ไบด์ (WC-CO) เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดกับอัตราการขจัดเนื้องานและอัตราส่วนการสึกหรอของอิเล็กโตรด โดยจะศึกษาตัวแปรสี่ตัวแปร คือ กระแสไฟฟ้า เวลาเปิด ขนาดของเกรน และการรวมกันของ ผงอนุภาคอลูมิเนียม เพื่อทำการศึกษหาพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดที่เกี่ยวข้อง โดยใช้เทคนิคของการ ผสมผงอลูมิเนียมเข้ากับของเหลวไดอิเล็กตริกในการสปาร์คชิ้นงาน การสปาร์คที่มีผงอลูมิเนียม อยู่ในของเหลวไดอิเล็กตริกระหว่างอิเล็กโตรดกับชิ้นงาน จะช่วยลดช่องว่างอิเล็กโตรดกับชิ้นงาน และลดความเป็นฉนวนของไดอิเล็กตริก ทำให้การปล่อยประจุง่ายและแพร่กระจายไปทั่วทั้ง ผิวชิ้นงานในการสปาร์ค ผลในการผสมผงอลูมิเนียมตัวนำไฟฟ้าลงไปกับของเหลวตัวกลาง คือ สามารถที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการสปาร์ค เมื่อเพิ่มผงอลูมิเนียมอัตราการขจัดเนื้องาน ก็จะเพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มที่สูงขึ้นอย่างมีขอบเขตจำกัด