



ความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นจากการตัดโลหะด้วยเครื่อง Wire Cut EDM
Residual Stress that is result on cutting steel by Wire Cut EDM

โดย



ปริญญาานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2535

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

032742

ความแตกต่างที่เกิดขึ้นจากการตัดโลหะด้วย wire cut EDM



(Handwritten signature)

(ผศ. ทวี เทศเจริญ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

032742

ความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นจากการตัดโลหะด้วย Wire Cut EDM

กรรณชัย กัลยาศิริ
ทวีสันต์ วิรัชพงศานนท์
พงศกร สุวรรณวงศ์
ผศ.ทวี เทศเจริญ
ปีการศึกษา 2535

อาจารย์ที่ปรึกษา

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้ศึกษาผลของพารามิเตอร์ในการตัดชิ้นงานของเครื่อง ไวร์ คัต อีดีเอ็ม ซึ่งมีผลต่อการเกิดความเค้นตกค้างในเหล็ก เอสเคตี 11 ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมาแล้ว ซึ่งพารามิเตอร์ที่ศึกษาได้แก่ ปริมาณของกระแสผ่านเส้นลวด โดยเปรียบเทียบค่าความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นจากปริมาณของกระแสที่ผ่านเส้นลวดด้วยค่าต่างๆกัน

Residual stress that is result in cutting steel by Wire Cut EDM

Kanachai Kanlayasiri

Taweesan wirachpongsanon

pongsakorn suwanwong

Advisor Asst. Prof. Tawee

Techareon

Abstract

This research deals with experimental study on residual stress in heat-treatment SKD 11 steel which is effected by value of parameter. The parameter that we are interested in is the peak current that passes through wires. The result from the experiment , the residual stress and peak current, will be compared to theoritical calculated values later.

สารบัญ

	หน้า
กล่าวนำ	1
วัตถุประสงค์	2
หลักการดำเนินงานของ Wire Cut EDM	3
การทดลองและผลการทดลอง	54
สรุปผลการทดลอง	70
ปัญหาและข้อเสนอนแนะ	71
กิตติกรรมประกาศ	72
เอกสารอ้างอิง	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล่าวนำ

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาอุตสาหกรรมด้านต่างๆของประเทศไทย เช่น อุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ อุตสาหกรรมพลาสติก ได้พัฒนาไปมากซึ่งการผลิตชิ้นงานหรืออุปกรณ์ที่จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเหล่านี้ต้องมีความเที่ยงตรงสูง ดังนั้นการผลิตชิ้นงานด้วยการตะไบ การไสหรือการกลึงจึงลดความสำคัญลงไป เพราะกรรมวิธีเหล่านี้ให้ความเที่ยงตรงน้อยและใช้ได้กับเหล็กที่มีความแข็งไม่มากนัก ในกรณีที่เป็นเหล็กที่มีความแข็งมากๆซึ่งได้ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมากก็ไม่สามารถผลิตด้วยวิธีนี้ได้ wire cut EDM สามารถเข้ามาแทนในจุดนี้ได้เพราะสามารถตัดชิ้นงานที่มีความแข็งมากๆได้และให้ความเที่ยงตรงสูงเนื่องจากควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ แต่ก็ยังพบว่าชิ้นงานที่ผ่านการตัดด้วย wire cut EDM นั้นจะมี Residual stress ในเนื้อโลหะบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากการตัดและได้พบว่า Residual stress ที่เกิดขึ้นนี้มีค่าแตกต่างกันไปสำหรับแต่ละค่า parameter ของการตัด ด้วยเหตุนี้ทำให้ทางกลุ่มสนใจที่จะศึกษาถึงค่า parameter ที่เหมาะสมสำหรับการตัดเหล็ก SKD 11 ที่ได้ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมาเพราะเหล็กชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้เป็นแม่แบบในงานอุตสาหกรรม

วัตถุประสงค์

หาค่า parameter ที่เหมาะสมสำหรับการตัดชิ้นงานที่ทำจากเหล็ก SKD 11 ที่ผ่านการทำ tempering มาแล้ว โดยจะหาค่าปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ผ่านเส้นลวด (I_p) ที่ทำให้เกิด residual stress ในเนื้อโลหะน้อยที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการทํางานของ Wire Cut EDM.

Wire Cut EDM เป็นเครื่องมือที่ให้พลังงานไฟฟ้าในการขึ้นรูป ด้วยวิธีสปาร์ค (Spark) ดังนั้นถ้าเป็นชิ้นงานที่เป็นสื่อไฟฟ้าเราสามารถขึ้นรูปได้แม้ว่าชิ้นงานนั้นจะมีความแข็งเพียงไร อีกทั้ง การขึ้นรูปยังใช้แรงกระทำน้อย ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับการขึ้นรูปที่ต้องการความละเอียดสูง นอกจากนี้เครื่อง EDM ยังสามารถขึ้นรูปรูปร่างที่มีความสลับซับซ้อนได้ ซึ่งการขึ้นรูปด้วยวิธีการอื่นไม่สามารถที่จะทำได้ ในปัจจุบันจึงมีการใช้ในอุตสาหกรรมการสร้างแม่พิมพ์

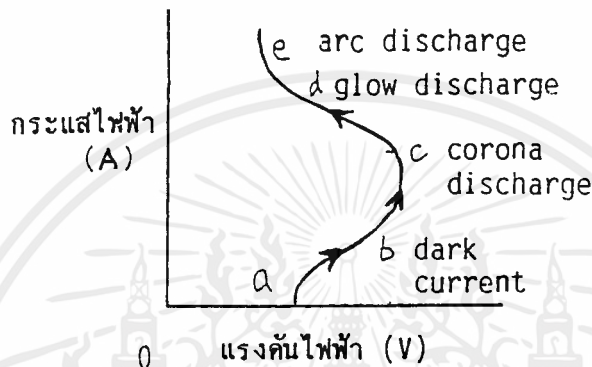
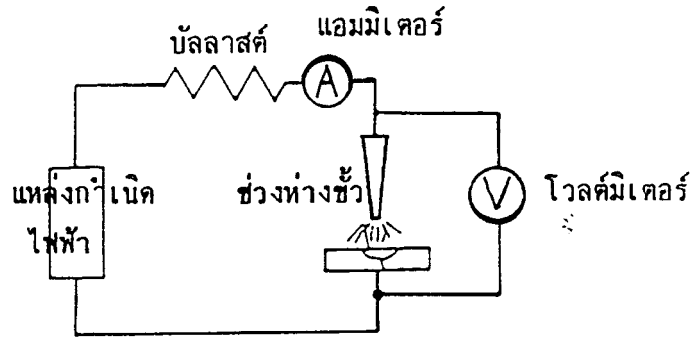
ความรู้พื้นฐานของการขึ้นรูปด้วยวิธีสปาร์ค

1. ปราภฏการณ์การสปาร์ค

ปราภฏการณ์การสปาร์ค เป็นชื่อเรียกโดยรวมของปราภฏการณ์ต่าง ๆ ซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่ใส่แรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าที่มีฉนวนไฟฟ้า ประเภทของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซกั้นกลางอยู่ จนทำให้ฉนวนไฟฟ้าเหล่านี้เกิดการสูญเสียความเป็นฉนวน (dielectric breakdown) และเกิดมีกระแสไฟฟ้าไหลขึ้นอย่างรุนแรง

ดังนั้นปราภฏการณ์ดังกล่าวนี้จะหมายถึง การฉีกฉนวน ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัตถุตัวกลางที่โดยปกติแล้วไฟฟ้าจะไหลผ่านได้ยาก และเมื่อถึงเวลาที่การฉีกฉนวนนี้ถึงขีดจำกัด ก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขนาดใหญ่ ไหลขึ้นมาอย่างกระทันหัน

สำหรับปราภฏการณ์การสปาร์คที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีนั้น คือ "ฟ้าผ่า" นอกจากนี้แล้วการทำให้เกิดการสปาร์คโดยมนุษย์สร้างขึ้น และนำมาประยุกต์ใช้งานนั้น ได้แก่ หลอดฟลูออเรสเซนต์หรือหลอดนีออน ซึ่งนับว่าเป็นปราภฏการณ์การสปาร์คในสภาวะปกติ และนำหลักการดังกล่าวนี้มาประยุกต์ใช้ทางอุตสาหกรรมนั้น ได้แก่ การเชื่อมแบบอาร์ค การขึ้นรูปด้วยวิธีสปาร์ค (เครื่อง EDM)



รูป 1 คุณสมบัติพิเศษแรงดันไฟฟ้า-กระแสไฟฟ้า ของการสปาร์ค

รูป 1 แสดงถึงคุณสมบัติพิเศษ แรงดันไฟฟ้า - กระแสไฟฟ้า ซึ่งเป็นคุณสมบัติพิเศษของการสปาร์คระดับพื้นฐานที่สุดอันหนึ่ง โดยการสร้างวงจรสปาร์คแบบง่าย ๆ ดังในรูป และทำให้เกิดการสปาร์คขึ้นในอากาศ

1-1 สภาพที่กระแสเริ่มไหล (dark current)

ถ้าเพิ่มแรงดันไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า (E) ดังเช่นในวงจรรูปนี้ให้สูงขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงจุดหนึ่ง อากาศจะเริ่มแตกตัวเป็นประจุไฟฟ้าเล็กน้อย และอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุเป็นลบจะถูกดึงดูดจากฝั่งขั้วลบไปสู่ฝั่งขั้วบวก ซึ่งในช่วงระยะนี้จะเริ่มมีกระแสไฟฟ้าไหลขนาดเล็กมากประมาณ $10^{-8} - 10^{-11}$ A สภาพเช่นนี้มีชื่อเรียกกันว่า สภาพที่กระแสเริ่มไหล (dark current)

1-2 การสปาร์คแบบโคโรนา (corona discharge)

และถ้าเพิ่มแรงดันไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าให้สูงยิ่งขึ้นไปอีก ผิวหน้าของ

ซีวีไฟฟ้าบางส่วนที่เกิดสนามไฟฟ้าแรงเป็นพิเศษ จะเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวน (dielectric breakdown) เราเรียกสภาวะเช่นนี้ว่า การสปาร์คแบบโคโรนา (สภาวะ C) ซึ่งเป็นสภาวะการสปาร์คที่ขาดเสถียรภาพอย่างมาก

1-3 การสปาร์คแบบโกลว (glow discharge)

บริเวณส่วนที่เกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนแล้วนั้น อิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบ จะไหลในส่วนนี้มากขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้กระแสไฟฟ้ามืดขนาดใหญ่ขึ้นอย่างรวดเร็วด้วย สภาวะการสปาร์คที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลาที่สั้นมากเช่นนี้ เรียกกันว่า การสปาร์คแบบโกลว หลอดนีออนต่างๆ ที่ใช้ตกแต่งในยามค่ำคืนก็อาศัยหลักการของการสปาร์คแบบนี้

1-4 การสปาร์คแบบอาร์ค (arc discharge)

หลังจากที่ประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่ระหว่างซีวีไฟฟ้าถูกปลดปล่อยออกมาและการสปาร์คแบบโกลวได้มีขนาดถึงกระแสไฟฟ้าค่าสูงสุดแล้ว การสปาร์คจะเข้าสู่สภาวะขั้นตอนสุดท้าย (d→e) ซึ่งหมายถึง การสปาร์คแบบอาร์ค สภาวะการสปาร์คเช่นนี้ จะเกิดขึ้นในลักษณะที่ควบคุมไม่ได้ ซึ่งเป็นสภาวะที่ไม่เหมาะสมกับการขึ้นรูปด้วยวิธีสปาร์ค ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการควบคุมพลังงาน ก่อนที่จะเข้าสู่สภาวะการสปาร์คแบบอาร์คนี้

การสปาร์คที่เป็นประกายไฟ โดยทั่วไปนั้นเป็นสภาวะการสปาร์คซึ่งเกิดขึ้นทุกขั้นตอน ตั้งแต่สภาวะที่กระแสเริ่มไหล (dark current) จนถึงสภาวะของการสปาร์คแบบอาร์ค (arc discharge) ภายในช่วงระยะเวลาที่สั้นมาก

การสปาร์คที่เป็นประกายไฟ จะมีช่วงเวลาที่สั้นมากราว $10^{-7} - 10^{-5}$ วินาที และยิ่งไปกว่านั้น ความหนาแน่นของกระแส (current density) จะมีค่าถึง $10^{14} - 10^{19}$ A/cm² ดังนั้นเราจึงทราบกันว่า การสปาร์คที่เป็นประกายไฟ จะปลดปล่อยพลังงานที่มีระดับสูงมากออกมาภายในช่วงเวลาที่สั้นมาก

2 ทฤษฎีของการขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM

การขึ้นรูปด้วยเครื่อง E.D.M. หมายถึง วิธีการขึ้นรูปซึ่งใช้กับโลหะเสียเป็นส่วนใหญ่ โดยการประยุกต์ใช้การสปาร์คที่เป็นประกายไฟ (พลังงานไฟฟ้า) ซึ่งขาดเสถียร

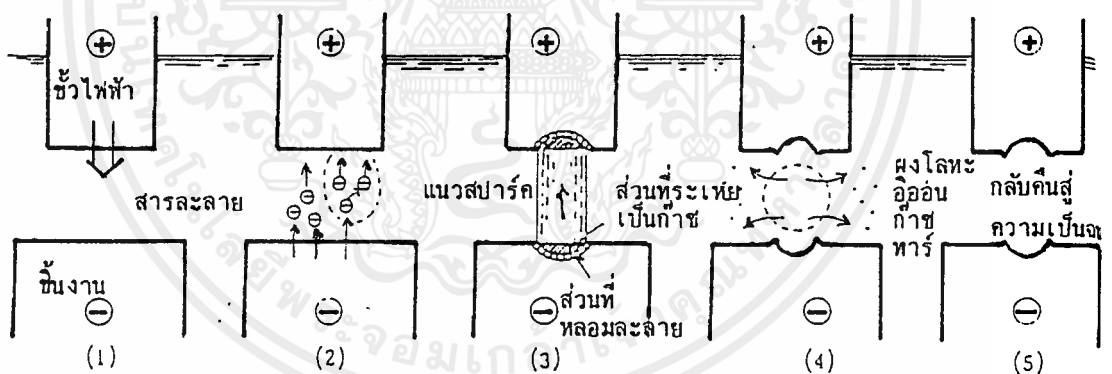
ภาพอย่างมาดั่งที่ได้กล่าวมาแล้ว และเราสามารถที่จะเปรียบเทียบวิธีการขึ้นรูปนี้ได้เสมือน "การใส่ผ้าเข้าไปในช่องว่างแคบ ๆ ระหว่างขั้วไฟฟ้ากับวัตถุที่จะขึ้นรูป"

สำหรับการขึ้นรูปในทางปฏิบัติจริงนั้น จะทำขึ้นภายในสารละลาย โดยใช้ทองแดง กราไฟต์ เป็นขั้วไฟฟ้า และวัตถุที่จะนำมาขึ้นรูปได้นั้น จะไม่เกี่ยวกับความแข็ง เพียงแต่ต้องเป็นวัตถุที่ไฟฟ้าไหลผ่านได้

ในการขึ้นรูปด้วยเครื่อง E.D.M. นั้น จะไม่ปล่อยให้กระแสไฟฟ้าไหลอย่างต่อเนื่องกันเหมือนกับการเชื่อมแบบอาร์ค แต่ต้องใช้วิธีการเปิด/ปิด กระแสไฟฟ้าเป็นช่วงจังหวะเพื่อป้องกันมิให้ความร้อนจากการสปาร์คหลอมละลายวัสดุมากเกินไปจนเสียรูปทรง

วิธีการขึ้นรูปประเภทนี้ อาศัยการใช้พลังงานระดับสูงซึ่งถูกปล่อยออกมาในช่วงเวลาที่สั้นมาก ดังนั้นปัญหาที่สำคัญมากสำหรับวิธีการขึ้นรูปนี้ก็คือ ทำอย่างไรจึงจะทำให้เกิดการสปาร์คที่เป็นประกายไฟอย่างมีเสถียรภาพและประสิทธิภาพสูง

ในการใช้งานจริงนั้น จะใช้ระบบ NC (numerical control) ควบคุมให้เกิดการสปาร์คถึงหลายแสนครั้งใน 1 วินาที สภาพของพัลส์ (pulse) แต่ละลูกของการสปาร์คจะเป็นไปดังต่อไปนี้



รูป 2 สภาพของการสปาร์คแต่ละครั้ง

2-1 ใส่แรงดันไฟฟ้า

เริ่มต้นด้วยการใส่แรงดันไฟฟ้า (ประมาณ 60-280 V) ที่ระหว่างชิ้นงานกับขั้วไฟฟ้า (เรียกว่า ระหว่างขั้ว) ในการขึ้นรูปนั้น โดยปกติจะใช้น้ำมัน เพื่อที่จะรักษาให้

ความต้านทานของฉนวนระหว่างขั้วมีค่าสูง เพราะว่าถ้าค่าความต้านทานของฉนวนระหว่างขั้วสูง ก็จะสามารถลดระยะระหว่างขั้ว (ช่องว่างการสปาร์ค) ให้แคบลงได้ ซึ่งจะมีผลดีในการขึ้นรูปที่มีความละเอียดสูง

2-2 สูญเสียความเป็นฉนวน

เมื่ออยู่ระยะระหว่างขั้วให้ใกล้เข้าเรื่อย ๆ จนถึงระยะหนึ่ง (หลาย μm - หลายสิบ μm) สารละลายจะเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวน อีออนประจุลบจะถูกดึงไปสู่ฝั่งที่เป็นบวก

2-3 สปาร์ค, หลอมละลาย

เมื่อเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนขึ้นแล้ว อิเล็กตรอนซึ่งเป็นประจุลบจะเริ่มไหลเป็นจำนวนมากอย่างรุนแรง ซึ่งก็คือ การสปาร์คนั่นเอง บริเวณที่เกิดการสปาร์คนี้ จะมีกระแสไฟฟ้าที่ความหนาแน่นสูงมากไหลในช่วงเวลานั้น ๆ ในการขึ้นรูปงานจริงนั้น กระแสไฟฟ้าจะมีขนาดตั้งแต่ 0.1 A จนถึงหลายร้อยแอมแปร์ พลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมาในช่วงนี้ จะทำให้บริเวณที่เกิดการสปาร์คมีอุณหภูมิสูงชันมาก ($3,000^{\circ}\text{C}$ ขึ้นไป) จนบางส่วนของชิ้นงานถูกหลอมละลาย นอกจากนั้นแล้วสารละลายบริเวณที่เกิดการสปาร์ค ก็จะถูกความร้อนที่เกิดขึ้นทำให้กลายเป็นก๊าซไป และเกิดความดันที่สูงชันมากเป็นบางส่วน

2-4 เย็นตัว

ความดันที่เกิดขึ้นนี้ จะทำให้ส่วนที่หลอมละลายของชิ้นงานหลุดกระเด็นไป ซึ่งเมื่อถูกสารละลายรอบข้างดูดซับความร้อนไปก็จะเป็นตัวลงอย่างรวดเร็วกลายเป็นเศษผงชิ้นเล็ก ๆ

2-5 กลับคืนสู่ความเป็นฉนวน

หลังจากที่การสปาร์คหนึ่งครั้งได้จบลงแล้ว จะพบว่าสารละลายจะกลับคืนสู่ความเป็นฉนวน โดยไม่มีการใส่แรงดันไฟฟ้าเข้าไป การรอในช่วงนี้ จะช่วยป้องกัน การเกิดสปาร์คแบบผิดปกติ เช่น สปาร์คซ้ำ หรือ สปาร์ค เฉพาะเป็นบางจุดอันเนื่องมาจากการสะสมหรือทับถมจับตัวกันของอีออนที่ตกค้างอยู่ระหว่างขั้วหรือเศษผงที่เกิดจากสปาร์ค

ภายหลังจากที่กลับคืนสู่ความเป็นฉนวนแล้ว ก็จะทำการสปาร์คเช่นเดิมอีก โดยเริ่มจาก 1.

การสปาร์คช้ำ : คือการสปาร์คที่เกิดขึ้นโดยไม่เกี่ยวข้องกับการควบคุมของระบบ NC ในกรณีที่มีภาวะแวดล้อมของการสปาร์คเลวลง อาจเกิดการสปาร์คขึ้นได้โดยไม่สัมพันธ์กับช่วงจังหวะของพัลส์ของการสปาร์ค ซึ่งถูกส่งมาจากวงจรการสปาร์ค เนื่องจาก การสปาร์คประเภทนี้เป็นปรากฏการณ์ที่นอกเหนือการควบคุม จึงไม่อาจถือว่าเป็นสภาพการสปาร์คที่เหมาะสมได้

ข้อควรคิด :

เวลาที่เกิดการหลอมละลายในช่วง 3. ทั้ง ๆ ที่ชิ้นงานงานหลอมละลาย แต่ทำไมชิ้นไฟฟ้าจึงไม่หลอมละลาย

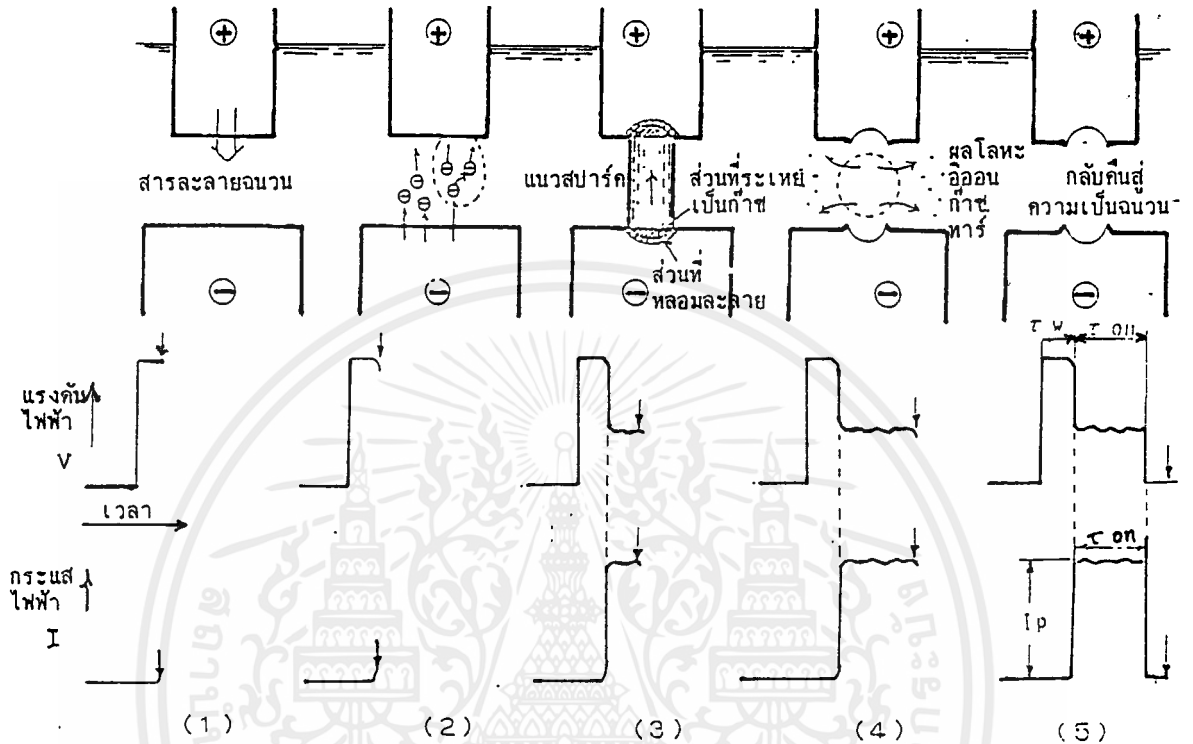
ในฐานะของธาตุเหล็ก (Fe) มีจุดหลอมเหลว $1,539^{\circ}\text{C}$ ทองแดงมีจุดหลอมเหลว $1,083^{\circ}\text{C}$ แต่ในความเป็นจริงแล้ววัสดุประเภทเหล็กกล้าจะมีคาร์บอนผสมอยู่ จึงทำให้จุดหลอมเหลวต่ำลง ส่วนชิ้นไฟฟ้านั้นทำมาจากทองแดงผสม จึงทำให้จุดหลอมเหลวยิ่งต่ำลงไปอีก แต่อย่างไรก็ตามชิ้นไฟฟ้าซึ่งมีส่วนประกอบหลักคือ ทองแดงจะมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำกว่า ดังนั้นถ้าลองคิดตามธรรมชาติแล้ว เมื่อได้รับความร้อนสูงจากการสปาร์ค ชิ้นไฟฟ้าก็ควรจะหลอมละลายก่อน ซึ่งหมายถึงว่า การสึกหรอจะรุนแรงกว่า

ถ้าลองสังเกตชิ้นไฟฟ้าหลังจากที่ใช้ในงานที่รูปเสร็จสิ้นลงแล้ว จะทราบได้ว่าบริเวณที่เกิดการสปาร์คจะมีเขม่าจับเป็นสีดำ เขม่าเหล่านี้เกิดขึ้นโดยคาร์บอนซึ่งเป็นส่วนประกอบอยู่ในสารละลายประเภทน้ำมันถูกความร้อนสูงจนละลายแยกตัวออกมาเกาะติดอยู่ที่ชิ้นไฟฟ้า คาร์บอนเป็นธาตุที่มีอัตราการนำความร้อนที่ต่ำมากคือ $0.057 \text{ Cal/cm}\cdot\text{sec}$ การที่คาร์บอนเกาะติดบนผิวของชิ้นไฟฟ้าจะทำให้เกิดขบวนการนำความร้อนซึ่งเกิดขึ้นจากการสปาร์ค ดังนั้นเราจึงสามารถกล่าวได้ว่า คาร์บอนเหล่านี้จะทำหน้าที่คุ้มครองผิวของชิ้นไฟฟ้าจากความร้อนสูง สิ่งทีกล่าวมานี้ถ้าจะนับได้ว่าเป็น เรื่องที่แปลกมากเกี่ยวกับการขึ้นรูปด้วยวิธีสปาร์ค

3 รูปร่างคลื่นของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

3-1 ตัวอย่างรูปร่างคลื่นการสปาร์ค

ในที่นี้ เราจะมาดูกันถึงว่า แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามีลักษณะเป็นเช่นไร รูปต่อไปนี้จะนำรูปร่างคลื่นของพัลส์ในการสปาร์ค (รูปร่างคลื่นของแรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า) มาประกอบรวมอยู่ในรูปก่อนหน้านี้นี้



รูป 3 รูปร่างคลื่นของแรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้าในถ้ำรชั้นรูปด้วยเครื่อง E.D.M.

3-1-1 ใส่แรงดันไฟฟ้า

ก่อนอื่นจะมีการใส่แรงดันไฟฟ้าที่ระหว่างขั้ว ซึ่งแรงดันไฟฟ้านี้เรียกว่า แรงดันไฟฟ้าไร้โหลด (no-load-voltage) (ประมาณ 60-280 V) ในสภาพเช่นนี้ระหว่างขั้วยังคงรักษาความเป็นจนวนได้อยู่ จึงไม่มีกระแสไหล

3-1-2 สูญเสียความเป็นฉนวน

เมื่อนำขั้วไฟฟ้าเข้าใกล้ชิ้นงาน (ทำให้ระยะห่างขึ้นแคบลง) จนถึงระยะหนึ่งจะเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนขึ้น ซึ่งทำให้อิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบเริ่มไหลกล่าวคือเริ่มมีกระแสไหล

3-1-3 สปาร์ค, หลอมละลาย

เมื่อการสปาร์คเริ่มต้น เนื่องจากว่ามีฉนวน (สารละลาย) อยู่ระหว่างขั้ว จึงทำให้แรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วต่ำลง $E = I \cdot R$ ตามกฎของโอห์ม แรงดันไฟฟ้าในช่วงนี้เรียกกันว่าแรงดันไฟฟ้าการสปาร์ค (discharge voltage)

3-1-4 เย็นตัว

ในช่วงที่เกิดการสปาร์คอยู่นั้น กระแสไฟฟ้าจะไหลในระดับค่า ๆ หนึ่ง แต่ทว่าเมื่อพลังงานที่สะสมอยู่ในระหว่างที่ถูกลดปล่อยออกมา แรงดันไฟฟ้าจะต่ำลงอย่างรวดเร็ว

3-1-5 กลับคืนสู่ความเป็นฉนวน

เมื่อการสปาร์คเสร็จสิ้นลง ทั้งแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า จะกลับกลายเป็นศูนย์

ดังนั้นเราจึงสามารถที่จะวาดรูปร่างของคลื่นในการสปาร์คได้ดังรูปดังกล่าวนี้

3-2 พารามิเตอร์ที่สำคัญ

- "เวลาการสปาร์ค T_{on} " = เวลาที่กระแสสปาร์คไหล

- "เวลาหยุดการสปาร์ค T_{off} " = เวลาตั้งแต่สปาร์คเสร็จจนถึงใส่แรงดันไฟฟ้าไว้ไหลอีกครั้งถัดไป

- "ค่ากระแส peak I_p " = ค่าสูงสุดของกระแสไฟฟ้า

- เวลาจนถึงเริ่มเกิดการสปาร์ค (เวลาที่ใส่แรงดันไฟฟ้าไว้ไหลอยู่) เรียกว่า "เวลารอการสปาร์ค" แทนด้วย " T_w " ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะระหว่างขั้ว แรงดันไฟฟ้า ค่าความต้านทานของฉนวนสารละลายในตอนนั้น

I_p, T_{on}, T_{off} , แรงดันไฟฟ้าไว้ไหล (V) เป็นพารามิเตอร์ที่ผู้ปฏิบัติงานจะกำหนดตั้งขึ้นตามแต่สภาวะในการขึ้นรูป ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้มีความสำคัญมากใน

การกำหนดระดับของพลังงานการสปาร์ค เมื่อเปรียบเทียบกับในหม้อพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของ
เงื่อนไขการขึ้นรูปด้วยวิธีการสปาร์ค ซึ่งมีจำนวนมาก

พลังงานการสปาร์คที่ช่วยในการขึ้นรูปนั้น มีค่าเป็นผลคูณระหว่างขนาดกระแส
 I_p กับเวลาการสปาร์ค T_{on} ดังนั้น จะเห็นได้ว่า ค่ากระแสในการขึ้นรูป I_p และเวลา
การสปาร์ค T_{on} จะเป็นองค์ประกอบสำคัญที่จะกำหนดระดับพลังงานการสปาร์ค

เวลาหยุดการสปาร์ค T_{off} จะเป็นเวลาสำหรับรอให้สารละลายกลับคืนสู่
ความเป็นฉนวน ซึ่งถ้าช่วงเวลานั้นสั้นเกินไป จะทำให้แรงดันไฟฟ้าไว้ไหลดสำหรับการ
สปาร์คครั้งถัดไปถูกอัดเข้ามา ในขณะที่ฉนวนยังไม่คืนสู่สภาพเดิม ซึ่งหมายถึงว่าได้เริ่มการ
สปาร์คต่อเนื่องไปโดยไม่มีเวลารอกการสปาร์ค T_{off} การสปาร์คเช่นนี้เรียกกันว่า การ
สปาร์คแบบอาร์ค (arc discharge) ซึ่งไม่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูป

แต่อย่างไรก็ตาม ถ้ากำหนดตั้ง T_{off} ให้ยาวจนเกินไป จำนวนของพัลส์การ
สปาร์คต่อรอบเวลาจะลดลง ซึ่งก็คือ พลังงานการสปาร์คจะน้อยลง ทำให้ปริมาณที่สกัด
ออกไปในการขึ้นรูป หรือความเร็วการขึ้นรูปลดต่ำลง ซึ่งมีผลทำให้ประสิทธิภาพการขึ้นรูป
ต่ำลงด้วย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องกำหนดช่วงเวลาดังกล่าวนี้ให้เหมาะสมพอดี

ค่ากระแสในการขึ้นรูป I_p และเวลาการสปาร์ค T_{on} เป็นตัวกำหนดระดับ
พลังงานการสปาร์ค ส่วน T_{off} นี้ จะเป็นพารามิเตอร์สำคัญในการ "ควบคุม" พลังงาน
การสปาร์ค

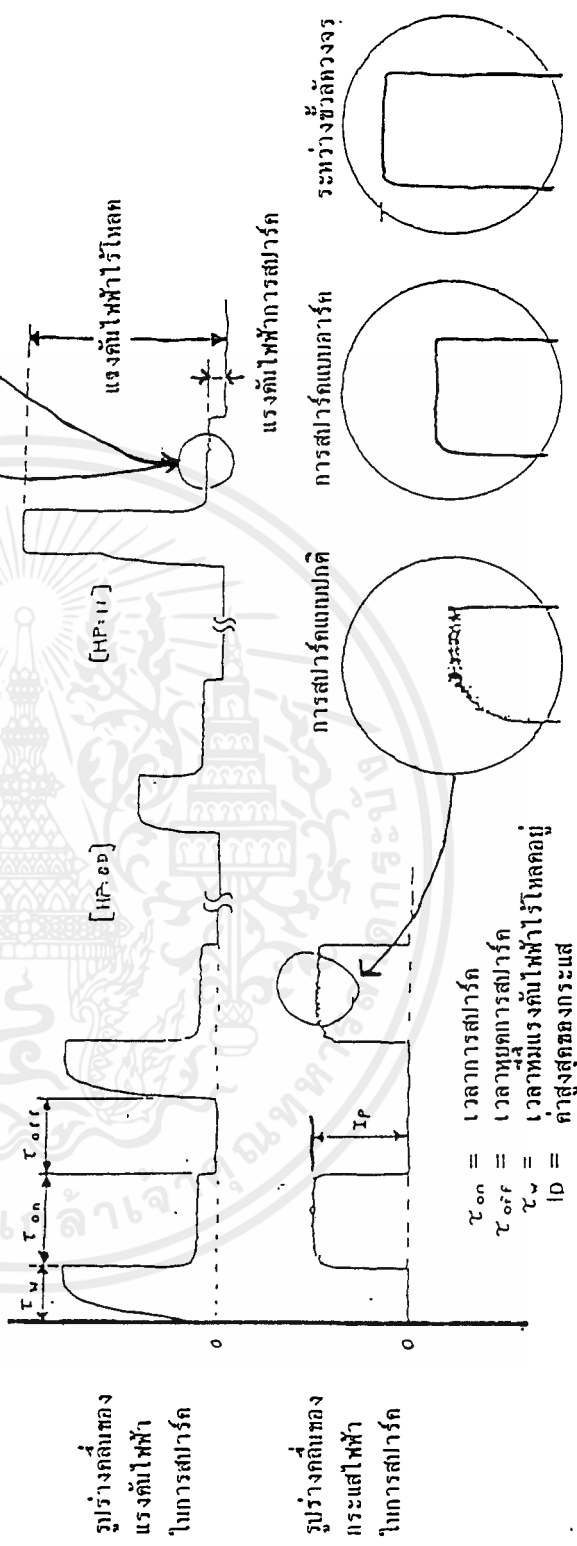
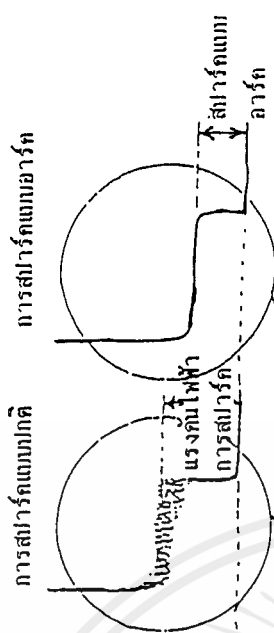
ในบางกรณี ถึงแม้ว่าสภาพการสปาร์คในการขึ้นรูปภายใต้เงื่อนไขหนึ่งจะดำ
เนินผ่านมาด้วยดีก็ตาม ถ้าหากว่า การขึ้นรูปได้ถูกดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ โดยที่ไม่สามารถ
ขจัดเศษผงที่เกิดจากการสปาร์ค หรือสิ่งเจือปนอื่น ซึ่งสลายตัวแยกออกมาจากสารละลาย
โดยความร้อนออกจากระหว่างขั้วได้หมด ซึ่งจะทำให้เกิดการสปาร์คซ้ำอันเป็นการลดประ
สิทธิภาพการขึ้นรูปให้ต่ำลง หรืออาจจะเปลี่ยนสภาพการสปาร์คไปเป็นแบบอาร์ค ซึ่งทำให้
การขึ้นรูปไม่สามารถดำเนินต่อไปได้ ในกรณีเช่นนี้ จะต้องยืดเวลา T_{off} ให้ยาวขึ้นเล็ก
น้อย เพื่อให้มีเวลาพอที่ระหว่างขั้วจะกลับคืนสู่สภาพปกติ

การคอยสังเกตรูปร่างคลื่นของแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้ว จะทำให้สามารถทราบ
ถึงสภาพดังกล่าวได้ และหัวข้อปัญหาที่สำคัญสำหรับเครื่อง E.D.M. ในปัจจุบันนี้คือ การ
ควบคุมการขึ้นรูปให้มีเสถียรภาพโดยการใช้อุปกรณ์ระบบ NC เพื่อควบคุมพัลส์การสปาร์ค
ดังนั้น บริษัทที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ จึงกำลังพยายามเต็มที่ในการพัฒนาอุปกรณ์ดัง
กล่าวนี้ขึ้นมา

ตัวแบ่งแรงดันไอการชาร์จในวงจร

แรงดันไอ การชาร์จ	τ_{on}	τ_{off}	IP	V	HP	HA	เวลาการชาร์จ	เวลาเบรก	แรงดันไฟฟ้า	กระแส
C170	19	19	10	1	11	1	350 μ sec	60 μ sec	90V	14A
C300	5	4	1	1	52	3	12 μ sec	24 μ sec	90V	1A

C170 เป็น จุ่มไอทึ่งใน จุ่มไอการชาร์จ และเป็น จุ่มไอแบบโรลเลอร์
 C300 เป็น จุ่มไอทึ่งใน จุ่มไอการชาร์จ และเป็น จุ่มไอแบบอคราสิทหรือตัว



τ_{on} = เวลาการชาร์จ
 τ_{off} = เวลาหยุดการชาร์จ
 τ_{v} = เวลาที่แรงดันไฟฟ้าไว้ตลอดเวลา
 I_D = ค่าสูงสุดของกระแส

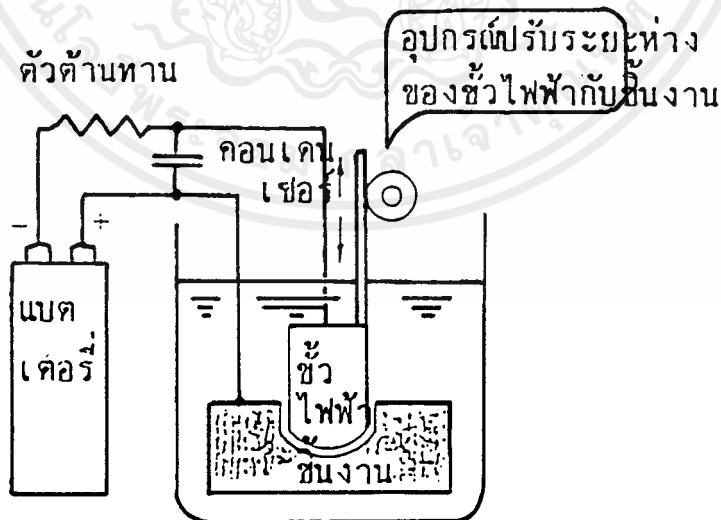
4 วงจรสปาร์ค

4-1 จุดเริ่มต้นของการขึ้นรูปด้วยวิธีสปาร์ค

สำหรับงานวิจัยทางกายภาพเกี่ยวกับปรากฏการณ์การสปาร์คนั้น ได้มีผลงานหลายอย่างที่ถูกระบุและนำเสนอออกมา ตั้งแต่สมัยนานมาแล้ว โดยนักวิจัยจำนวนมาก เช่น J.J. Thomson, J.S. Townsend, L.H. Paschen ฯลฯ แต่อย่างไรก็ตามทฤษฎีที่แน่ชัดก็ยังไม่ได้ถูกตั้งขึ้นมาแม้แต่จนปัจจุบันนี้ สาเหตุที่การทฤษฎีเพื่อนำมาอธิบายปรากฏการณ์การสปาร์คให้ถูกต้องแน่ชัด ยังเป็นปัญหาที่ยากอยู่นั้น เนื่องมาจากปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้มีองค์ประกอบที่ไม่แน่ชัดมากเกินไปนั่นเอง (ปรากฏการณ์การสปาร์ค ยังคงเป็นสิ่งที่เราไม่สามารถเข้าใจได้อย่างแจ่มชัด แม้ในปัจจุบัน ดังนั้นการสร้างเครื่อง E.D.M. ซึ่งประยุกต์ใช้ปรากฏการณ์ที่ไม่ค่อยเข้าใจนี้ จึงเป็นงานที่ยากมาก)

อุปกรณ์ที่เป็นต้นแบบของเครื่อง E.D.M. ในปัจจุบัน ได้มาจากการวิจัยของ ลาสซาเรนโก (Lazarenko) ชาวรัสเซีย ในปี 1943

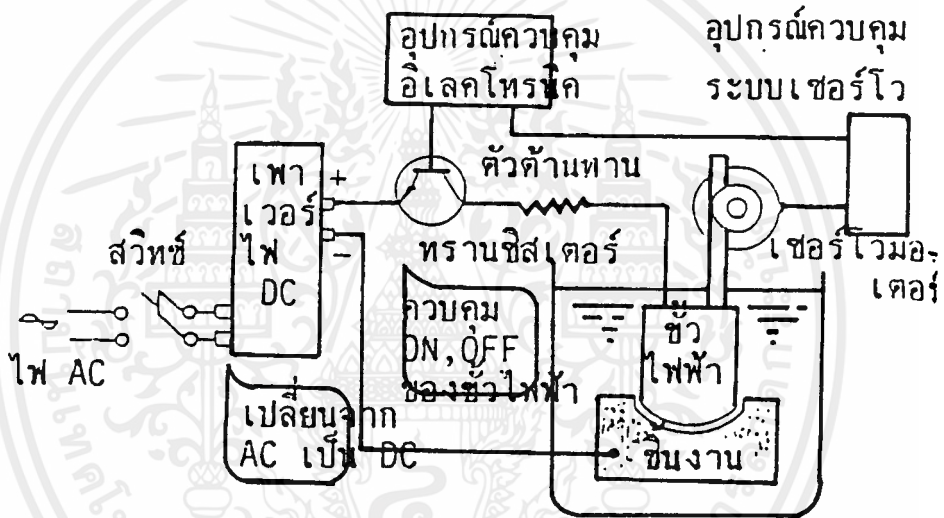
วงจรของลาสซาเรนโกนั้น ใช้ตัวต้านทาน (R) และคอนเดนเซอร์ (C) มาประกอบรวมกันเพื่อควบคุม ON/OFF ของกระแสไฟฟ้า ซึ่งมีชื่อเรียกกันว่า วงจร RC (หรือ วงจรลาสซาเรนโก) วงจรนี้ใช้ทองแดงเป็นขั้วไฟฟ้า และใช้ในการขึ้นรูปวัสดุประเภทเหล็กกล้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสมัยนั้นการขึ้นรูปด้วยวงจรรัน ได้ถูกตั้งความหวังไว้ว่า จะเป็นวิธีการที่ตีเลิศสำหรับการขึ้นรูปโลหะประเภทแข็ง แต่วิธีนี้ยังคงมีจุดบกพร่องหลายจุด จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในแขนงพิเศษบางส่วนเท่านั้น โดยที่ไม่สามารถนำมาใช้ในทางอุตสาหกรรมได้

จุดบกพร่องของวิธีนี้ได้แก่ เราไม่สามารถควบคุมเงื่อนไขของสปาร์ค (พลังงาน) โดยอิสระได้ และความเร็วในการขึ้นรูปก็ช้ามาก รวมทั้งการสึกหรอของขั้วไฟฟ้า เป็นไปอย่างรุนแรง ดังนั้น วิธีนี้จึงไม่สามารถที่จะขึ้นรูปโลหะด้วยความละเอียดที่ดีโดยอิสระได้ในสมัยนั้น



4-2 วงจรลาซาเรนโก้ (วงจร RC)

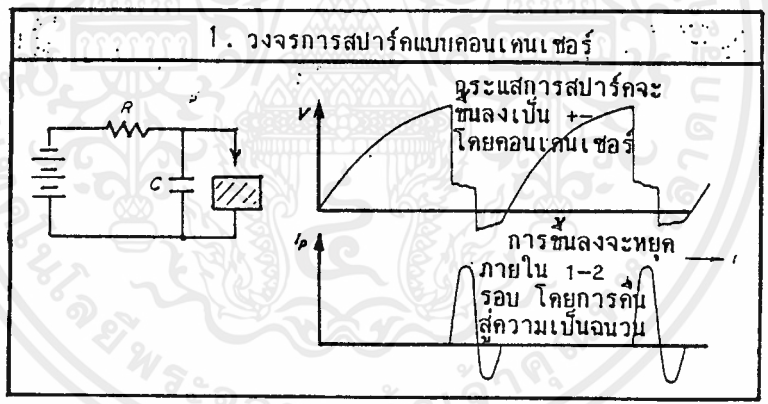
วงจรลาซาเรนโก้ ประกอบขึ้นด้วยคอนเดนเซอร์และตัวต้านทาน และเป็นวงจรที่ทำให้เกิดการสปาร์ค ประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่ในคอนเดนเซอร์เพียงชั่วระยะหนึ่ง เมื่อระหว่างขั้วได้ระยะที่จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขนาดที่เหมาะสมระดับหนึ่ง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับประจุไฟฟ้าของคอนเดนเซอร์ด้วยนั้น การสปาร์คก็จะเริ่มขึ้น โดยที่ประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่ในคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เดนเซอร์จะถูกปลดปล่อยออกมา และเกิดปรากฏการณ์การสปาร์คขึ้นที่ระหว่างขั้ว เมื่อการปลดปล่อยประจุไฟฟ้าจบสิ้นลง แบตเตอรี่ก็จะทำหน้าที่ชาร์ตประจุไฟฟ้าเข้าไปในคอนเดนเซอร์อีกครั้งหนึ่ง

ความเร็วในการชาร์ตประจุเข้าสู่คอนเดนเซอร์นี้ จะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทาน R และค่าความจุของคอนเดนเซอร์ C เนื่องจากการเลือกค่าทั้งสองนี้ ซึ่งจะนำมาใช้งานในวงจรนี้ได้ นั้น มีขอบเขตจำกัด จึงเป็นจุดบกพร่องที่ว่าไม่สามารถควบคุมพลังงานอย่างอิสระได้

คราวนี้ เราจะลองมาพิจารณาเกี่ยวกับความเร็วในการขึ้นรูป ความเร็วในการขึ้นรูปนี้จะมีอิทธิพลสำคัญมากในการคำนึงถึงประสิทธิภาพการผลิต และการลดต้นทุนการผลิต ความเร็วในการขึ้นรูปหมายถึง ปริมาณที่สามารถขจัดออกไปได้ (ปริมาณการขึ้นรูป) ต่อหนึ่งหน่วยเวลา ในกรณีของการขึ้นรูปประเภทตัดนั้น ถ้าทำให้ปริมาณการตัดลดลงในชิ้นงาน ปริมาณการป้อนส่ง ของมีดตัดมากขึ้น ความเร็วในการขึ้นรูปก็จะสูงขึ้นด้วย ส่วนในกรณีของการขึ้นรูปด้วยวิธีการสปาร์คนี้ ถ้าพลังงานการสปาร์คที่ระหว่างขั้วมีระดับสูงขึ้น ปริมาณของโลหะที่จะหลอมละลายก็ควรที่จะมากขึ้น ซึ่งหมายถึงว่า ความเร็วในการขึ้นรูปก็ควรที่จะสูงขึ้นไปด้วยแต่ในความเป็นจริงแล้ว จะค่อนข้างซับซ้อนมากกว่านี้เล็กน้อย



รูป 7 คุณสมบัติพิเศษการสปาร์คของวงจรการสปาร์คแบบคอนเดนเซอร์ (วงจรลาซาเรนโก้)

พลังงานการสปาร์ค จะเท่ากับผลคูณระหว่างกระแสไฟฟ้าในการขึ้นรูป I_p กับเวลาการสปาร์ค T_{on} ถ้าทำให้ I_p มีขนาดใหญ่ขึ้น หรือ T_{on} ยาวขึ้น พลังงานดังกล่าวนี้ก็จะมีความสูงขึ้น

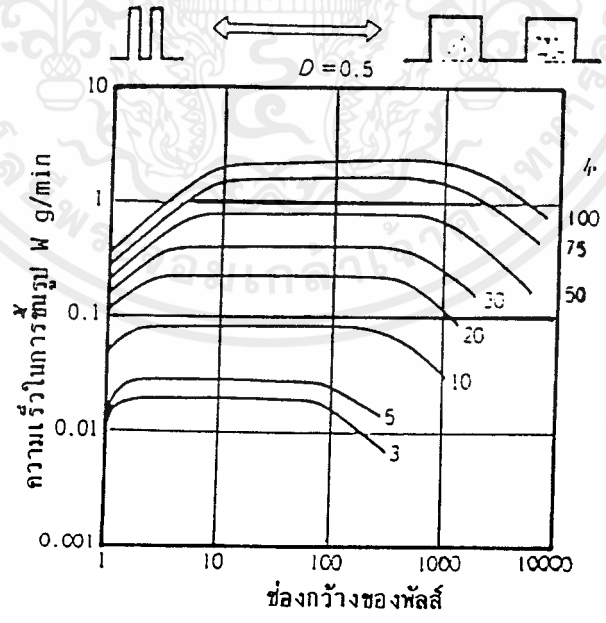
แต่เท่าที่ในปัจจุบันนี้เป็นที่ทราบกันว่า ส่วนที่เริ่มต้นของพัลส์การสปาร์ค (กระแสไฟฟ้าเริ่มไหล) จะมีผลเกี่ยวข้องกับการขึ้นรูป เราสามารถอธิบายสิ่งนี้ได้ว่า ถ้ากระแส

ไฟฟ้าเริ่มไหลอย่างรวดเร็ว แรงกระแทก (แรงดันการสปาร์ค) โดยการสปาร์คก็จะมากขึ้น ปริมาณของโลหะที่หลอมละลายก็จะมากขึ้น และยังอาจจัดการเศษการขึ้นรูปให้กระจายออกไปอย่างเพียงพออีกด้วย

ถึงแม้ว่าจะกำหนดตั้งให้เวลาการสปาร์ค T_{on} ยาวขึ้นก็ตาม แรงกระแทกโดยการสปาร์คจะไม่มากขึ้น ปริมาณของโลหะที่หลอมละลายในการสปาร์คแต่ละลูกคลื่นก็ไม่มากขึ้น และถ้า T_{on} ยาวจนเกินไป อาจจะมีผลในทางตรงกันข้ามคือ ทำให้ความเร็วในการขึ้นรูปลดต่ำลงอีกด้วย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ถ้าต้องการทำให้ความเร็วในการขึ้นรูปสูงขึ้น เรามีความจำเป็นที่จะต้องเพิ่มขนาดของกระแสไฟฟ้าในการขึ้นรูป I_p ให้ใหญ่ขึ้น และควบคุมบังคับให้เวลาการสปาร์ค T_{on} จบลงในช่วงเวลาที่เหมาะสม

แต่อย่างไรก็ตาม ก็ยังมีปัญหาเหลืออยู่ ดังที่สามารถเข้าใจได้ในรูป 7-2 การทำให้กระแสไฟฟ้าในการขึ้นรูป I_p มีขนาดใหญ่ขึ้น ก็จะทำให้เวลาในการเริ่มไหล (STARTING TIME) ของกระแสไฟฟ้ายาวขึ้นไปด้วย การที่กระแสไฟฟ้าในการขึ้นรูปเพียงแต่ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ นั้น จะไม่มีผลทำให้แรงกระแทกโดยการสปาร์คใหญ่ขึ้นด้วยเลย

ดังนั้นวิธีการที่เหมาะสมก็คือ ใช้วงจรการสปาร์คที่สามารถที่สามารถทำให้กระแสไฟฟ้าขนาดใหญ่ เริ่มไหลขึ้นอย่างรวดเร็วได้ ถ้าจะพิจารณาจากคุณสมบัติพิเศษของคอนเดนเซอร์แล้วเราไม่สามารถหวังได้ว่า วงจร RC จะสามารถทำให้กระแสไฟฟ้าการสปาร์คเริ่มไหลขึ้นอย่างรวดเร็วได้



รูป 7-2 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องกว้างของพัลส์กับความเร็วในการขึ้นรูป

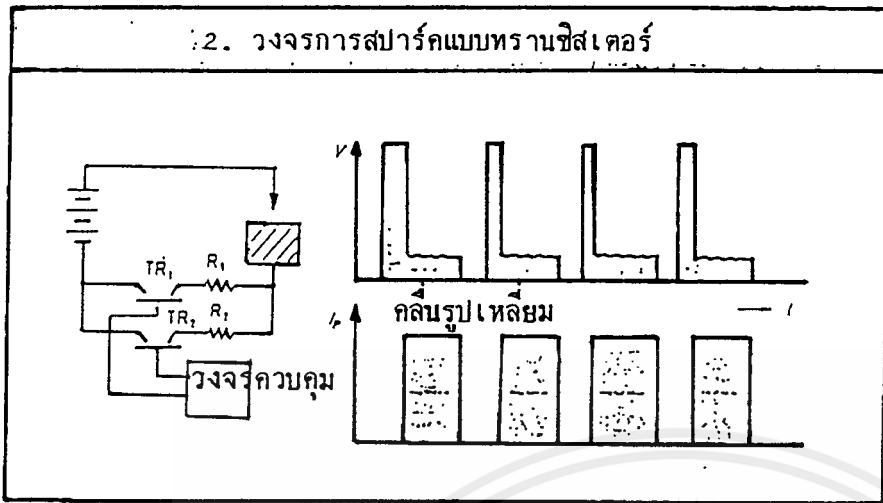
นอกจากนี้แล้ว ถ้าเป็นวงจร RC คอนเดนเซอร์จะใช้เวลามากในการปลดปล่อยประจุไฟฟ้าที่สะสมไว้ออกมา ถ้าสังเกตด้วยตาของมนุษย์ธรรมดา จะเห็นว่าใช้เวลาสั้น ๆ เพียงชั่วพริบตาเดียว แต่ถ้าจะสังเกตและวัดด้วยหน่วยเวลาระดับไมโครแล้ว จะทราบว่า การปล่อยประจุไฟฟ้าออกมาของคอนเดนเซอร์มีคุณสมบัติพิเศษที่ใช้เวลายาวในเชิงเปรียบเทียบ ถ้าจะเร่งให้ความเร็วในการขึ้นรูปเร็วขึ้น โดยการเริ่มชาร์ตประจุไฟฟ้าครั้งถัดไปทันทีหลังจากที่การสปาร์ตครั้งก่อนเพิ่งจบลง จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้า การสปาร์ตครั้งถัดไปขึ้นระหว่างชั่วขณะที่การคืนสู่ความเป็นฉนวนยังไม่พอเพียง ผลที่เกิดขึ้นก็คือ T_{off} จะหายไป และการสปาร์ตจะกลายเป็นแบบอาร์ค ซึ่งจะก่อให้เกิดอุณหภูมิของระหว่างชั่วขณะเกินไปจนฉนวนการขึ้นรูปหยาบเกินไป

และถ้าพิจารณาถึงวงจรที่มีเฉพาะ RC เท่านั้น จะเห็นว่าวงจรดังกล่าวนี้ขาดองค์ประกอบซึ่งจะทำหน้าที่เป็นสวิตช์เพื่อคอยตัดกระแสไฟฟ้ การสปาร์ตในช่วงระหว่างส่วนที่เป็นแหล่งจ่ายไฟของการสปาร์ตถึงระหว่างชั่ว ซึ่งหมายถึงว่า เมื่อประจุไฟฟ้าจากคอนเดนเซอร์ เริ่มถูกปลดปล่อยออกมาแล้ว จะมีแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นอยู่ที่ประจุไฟฟ้าที่ถูกปลดปล่อยออกทั้งหมด ในกรณีเช่นนี้ ถึงแม้ว่า เราต้องการที่จะหยุดกลางคันระหว่างการสปาร์ต ก็ทำไม่ได้

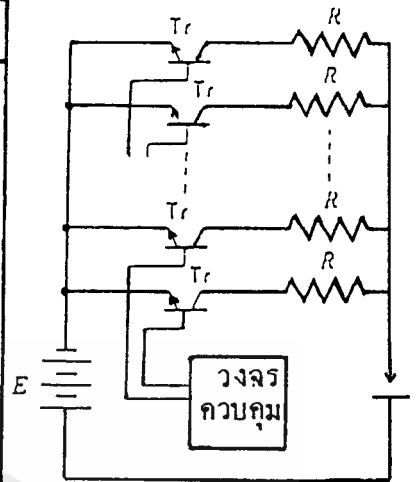
ดังนั้น เราสามารถที่จะกล่าวได้ว่า คุณสมบัติพิเศษของการสปาร์ตของวงจร RC จะถูกกำหนดตายตัวลงไป ตามองค์ประกอบต่าง ๆ คือ คอนเดนเซอร์, ตัวต้านทาน, คุณสมบัติพิเศษของฉนวนระหว่างชั่ว ซึ่งหมายถึงว่า เราไม่สามารถที่จะควบคุมปรับเวลาของ T_{on} , T_{off} ตามต้องการได้

4-3 คุณสมบัติของทรานซิสเตอร์

วิวัฒนาการของวงจรการสปาร์ตนั้น เป็นประวัติศาสตร์ของการคิดค้นหาวิธีที่จะควบคุมพลังงานของการสปาร์ต ถ้าเป็นวงจร RC แล้ว เราไม่สามารถที่จะควบคุมกระแสไฟฟ้ แรงดันไฟฟ้ จังหวะ (timing) ของพัลส์การสปาร์ตได้ตามต้องการ ดังนั้นจึงได้เคยมีการทดลองใช้หลอดสุญญากาศทำหน้าที่เป็นสวิตช์ในวงจรการสปาร์ตมาแล้ว แต่ก็ไม่สามารถที่จะพัฒนาขึ้นมาจนใช้งานได้ เราสามารถกล่าวได้ว่าวิวัฒนาการของเครื่อง E.D.M. นั้น มีความสัมพันธ์กับการคิดค้นทรานซิสเตอร์ขึ้นมาได้ เช่นเดียวกันกับอุปกรณ์ทางอุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์เครื่องไฟฟ้



รูป 8



รูป 9

วงจรการสพาร์คแบบทรานซิสเตอร์ จะมีโครงสร้างดังรูป 8 ถ้าใช้สวิตซ์ในการทำให้แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากเพาเวอร์ซัพพลายกระแสตรง (แหล่งจ่ายไฟการสพาร์ค) เกิดการ ON ในช่วงเวลาที่สั้น ๆ จะทำให้เกิดการสพาร์คขึ้นที่ระหว่างขั้ว และใช้ทรานซิสเตอร์เป็นตัวเปิดปิด (switching) ทำหน้าที่เป็นสวิตซ์ดังกล่าวนี้ ยิ่งไปกว่านั้น จังหวะในการส่งจ่ายไปยังระหว่างขั้ว จะขึ้นโดยตรงกับคุณสมบัติการเปิดปิด (สวิตซ์แบบไร้จุดสัมผัส) ของทรานซิสเตอร์ วงจรนี้จึงสามารถที่จะทำการเปิดปิดสลับกันไปได้อย่างรวดเร็วมาก

และถ้าสวิตซ์อยู่ในสภาวะ OFF จะไม่มี แรงดันไฟฟ้า การสพาร์คอยู่ที่ระหว่างขั้ว จึงทำให้วงจรสามารถควบคุมการตัดต่อกระแสไฟฟ้การสพาร์คได้อย่างสมบูรณ์ ในกรณีของบริษัทโซดิกส์นั้น ตามสเปคของเครื่องแบบมาตรฐานแล้ว ค่าสูงสุดของกระแสไฟฟ้การขึ้นรูปโดยเฉลี่ยคือ 40A ในความเป็นจริงแล้วทรานซิสเตอร์ 1 ตัว จะรับภาระโหลดมากเกินไป ถ้ามีกระแสไฟฟ้โดยเฉลี่ย 40A ไหลผ่าน ดังนั้นจึงมีการต่อทรานซิสเตอร์หลายตัวในแบบขนาน ดังรูป 9 เพื่อที่จะแบ่งกระจายภาระโหลด ตามค่าของกระแสไฟฟ้การขึ้นรูปของแต่ละช่วง

ดังนั้น ถ้าใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมการเปิดปิดของทรานซิสเตอร์ดังกล่าว นี้ก็จะทำให้วงจรการสพาร์คทำงานได้อย่างคล่องตัวและขอบเขตกว้างขวาง โดยเฉพาะ

การควบคุมเวลา นอกจากนั้นแล้ว ถ้านำคอมพิวเตอร์มาใช้ในการควบคุมแกนพิกัดในการขึ้นรูป ซึ่งเป็นองค์ประกอบอย่างหนึ่งที่จะทำให้เครื่อง E.D.M. สมบูรณ์นั้น ก็จะทำให้สามารถป้อนแกนพิกัดให้เหมาะสมกับสภาวะของระหว่างขั้วได้

เทคโนโลยีเหล่านี้ บริษัท โชดิกส์ในสมัยนั้น (ปี 1960 กว่า) ได้เป็นผู้ค้นคิดขึ้น และได้นำมาประยุกต์สร้างเป็นเครื่องจริงขึ้นมาเป็นครั้งแรกของโลก ซึ่งเครื่องดังกล่าวนี้ได้กลายเป็นต้นแบบของเครื่อง E.D.M. ระบบ NC ในปัจจุบัน สำหรับลักษณะเฉพาะตัวทางเทคนิคนี้ สามารถที่จะสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. วงจรการสปาร์คและแกนพิกัดในการขึ้นรูป ถูกควบคุมด้วยระบบ NC ในปัจจุบัน เครื่อง E.D.M. ที่ผลิตขึ้นมาั้น โดยส่วนมากจะใช้ระบบ NC โดยเฉพาะเครื่อง Wire Cut E.D.M. นั้น เป็นเครื่องจักรที่เกิดมาได้โดยใช้ระบบ NC ตั้งแต่แรก
2. แกนพิกัดในการขึ้นรูป (ได้แก่ แกน X,Y,Z) ทำงานภายใต้มอเตอร์ควบคุมมีความละเอียดในการส่งป้อน 1/1,000-1/10,000 mm
3. วงจรการสปาร์คใช้เฟาเวอ์ FET (P-MOS) ในการควบคุมพัลส์การสปาร์คได้ละเอียดในหน่วยเวลาระดับ nsec

เฟาเวอ์ FET มีคุณสมบัติพิเศษการเปิดปิด ซึ่งมีการตอบสนอง (responsibility) ที่ไวกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับขิงเกิล เฟาเวอ์ ทรานซิสเตอร์แบบธรรมดา ถึงประมาณ 10 เท่า จึงถูกใช้เป็นหัวใจสำคัญของวงจรการสปาร์คในปัจจุบัน นอกจากนั้นแล้ว ในแต่ละปีได้มีการพัฒนาให้ความเร็วในการเปิดปิดเร็วขึ้น สามารถผ่านกระแสไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ขึ้นได้ ในปัจจุบันแต่ละบริษัทที่เกี่ยวข้องได้มีการแข่งขันกันอย่างกว้างขวางในด้านการพัฒนาเทคโนโลยี เพื่อให้สามารถที่จะควบคุมพัลส์การสปาร์ค (พลังงาน) ให้เร็วขึ้น ละเอียดขึ้น และถูกต้องขึ้น

หมายเหตุ : FET = Field Effect Transistor

MOS = Metal Oxide Semi-Conductor

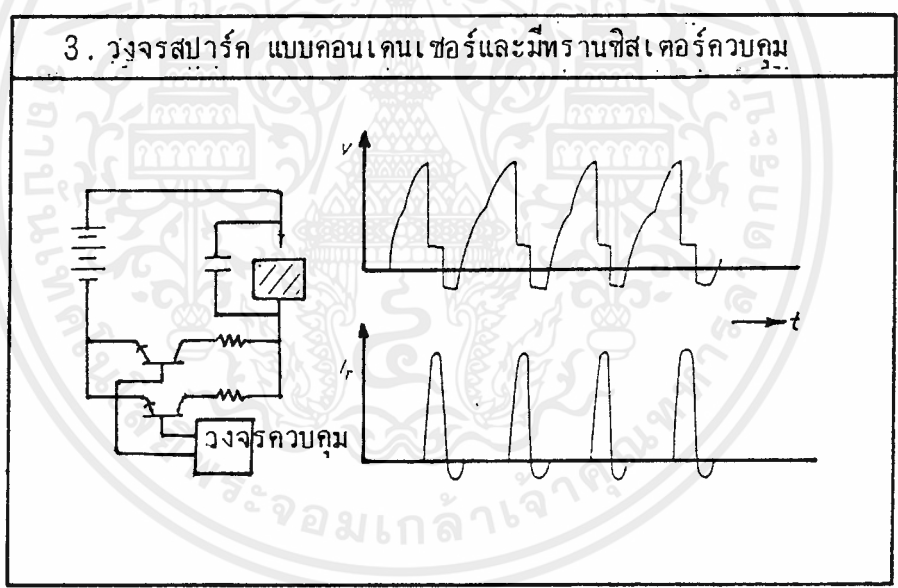
ในปี 1960 ประเทศญี่ปุ่นได้มีการทดลองเร่งความเร็วในการเปิดปิดอย่างต่อเนื่องของการสปาร์คโดยใช้ทรานซิสเตอร์เป็นสวิทช์ เพื่อเพิ่มสมรรถนะการขึ้นรูปให้มีระดับสูงชันกว่าเดิมมาก ในสมัยนั้น ฟูกูอวา (ปัจจุบันดำรงตำแหน่งประธานบริษัทโชดิกส์) ได้เป็นแกนกลางของกลุ่มผู้ทำการทดลอง ซึ่งในการทดลองครั้งนั้นได้ผลที่ไม่คาดหมายมาก่อน คือ ขั้วไฟฟ้าไม่เกิดการสึกหรอโดยการขึ้นรูป และตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา ก็เป็นที่ทราบกัน

อย่างแจ่มชัดว่าการขึ้นรูปหยาบด้วยวิธีสปาร์คนั้น สามารถกระทำในเงื่อนไขแบบไม่สีกหรือได้

4-4 วงจรคอนเดนเซอร์ควบคุมด้วยทรานซิสเตอร์

วงจร RC นั้น มีจุดบกพร่อง ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่ทว่า การสอดใส่คอนเดนเซอร์ที่มีขนาดความจุน้อยเข้าที่ระหว่างขั้วของวงจรทรานซิสเตอร์ ก็จะทำให้สามารถเพิ่มขนาดของค่าสูงสุดของกระแสไฟฟ้า I_p ขึ้นได้ (ในการใช้งานจริงนั้น วงจรสามารถที่จะ ON/OFF เฉพาะส่วนของคอนเดนเซอร์ได้ด้วยสวิทช์ หรือคำสั่งจากระบบ NC)

ดังนั้น วงจรดังกล่าวจึงสามารถที่จะสร้างรูปร่างคลื่นของการสปาร์คที่มีค่าสูงสุดของกระแส I_p สูง และ T_{on} สั้นขึ้นมาได้ ซึ่งลักษณะการสปาร์คเช่นนี้เหมาะสำหรับที่จะใช้ในงานขึ้นรูปละเอียด งานขึ้นรูปที่มีพื้นที่ขนาดเล็ก ซึ่งไม่สะดวกในการใช้พลังงานสูง งานขึ้นรูปโลหะผสมประเภทคาร์ไบด์



รูป 10

5 เครื่อง E.D.M. ในปัจจุบัน

ถึงแม้ว่าเราจะสามารถทำให้การสปาร์คอย่างสมบูรณ์เกิดขึ้นได้หลายลูกคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่จบลงเพียงแค่นั้น ก็ไม่มีความหมายในการใช้งาน อย่างไรก็ตามเรามีความจำเป็นที่จะต้องควบคุมให้สภาพการสเปิร์คสมบูรณ์อยู่ตลอดเวลาอีกด้วย

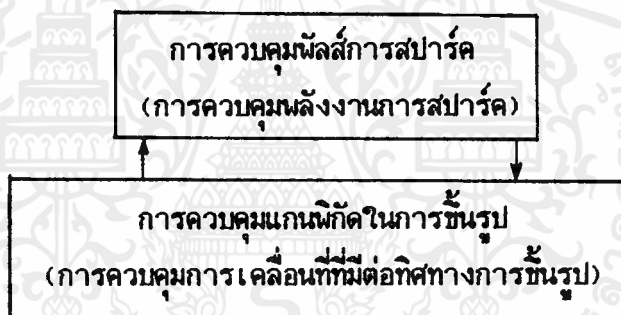
ดังนั้นปัญหาเกี่ยวกับหัวข้อนี้คือ เราจะมียุทธวิธีเช่นใดที่จะสามารถควบคุมการสเปิร์คซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เร็วมากได้ นอกจากนั้นการควบคุมเครื่อง E.D.M. ซึ่งเป็นเครื่องจักรสำหรับการขึ้นรูป จะสามารถทำได้อย่างไร

5-1 องค์ประกอบของการควบคุม

การควบคุม เครื่อง E.D.M. นั้น มีองค์ประกอบที่สำคัญอยู่ 2 อย่างคือ

1. การควบคุมพัลส์การสเปิร์ค (การควบคุมพลังงานการสเปิร์ค)
2. การควบคุมแกนพิกัดในการขึ้นรูป (การควบคุมการเคลื่อนที่ที่สอดคล้องทิศทางการขึ้นรูป)

การควบคุมทั้ง 2 อย่างนี้ จะต้องถูกดำเนินการอย่างสัมพันธ์กัน ซึ่งถ้าขาดอย่างใดอย่างหนึ่ง ก็จะทำให้การขึ้นรูปดำเนินไปด้วยดีไม่ได้



1. การควบคุมพัลส์การสเปิร์ค (การควบคุมพลังงานการสเปิร์ค)

การที่จะควบคุมพัลส์การสเปิร์คนั้น ก่อนอื่นจำเป็นที่จะต้องรู้ถึงสภาวะระหว่างขั้วเสียบก่อน อนึ่ง สิ่งในระบบ NC จะสามารถตรวจจับได้จริงโดยตรงนั่นคือ แรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้ว และถ้าเราติดตามคอยบันทึกแรงดันไฟฟ้านี้ของแต่ละช่วงเวลา เราก็จะได้รูปร่างคลื่นของแรงดันไฟฟ้าการสเปิร์ค (บันทึกการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าในสถานะของฟังก์ชันของเวลา) การติดตามจับรูปร่างคลื่นดังกล่าวนี้ จะทำให้เราสามารถรู้ถึงสภาวะระหว่างขั้วได้ T_{on} , T_{off} ในความเป็นจริงนั้น เราก็สามารถที่จะตรวจวัดได้จากรูปร่างคลื่นนี้

ยกตัวอย่างเช่น ระดับความเสถียร (stability) ของการสเปิร์คนั้น เราสามารถคำนวณหาได้โดยอินทิเกรตรูปร่างคลื่นแรงดันไฟฟ้านี้ในสถานะฟังก์ชันของเวลา

เพื่อคำนวณค่าเบี่ยงเบนความถี่ของการสปาร์ค (การกระจายของแรงดันไฟฟ้าการสปาร์ค ที่ดูในเชิงเวลา) ค่าเบี่ยงเบนความถี่ของการสปาร์ค จะมีความหมายเช่นเดียวกับกับ "ระดับความเสถียรของการสปาร์ค" ดังนั้น ถ้าทำการคำนวณค่าเบี่ยงเบนดังกล่าวนี้ได้อย่างสม่ำเสมอ ก็สามารถที่จะตรวจสอบคุณภาพของความเสถียรของการสปาร์คได้

2. การควบคุมแกนพิกัดในการขึ้นรูป (การควบคุมการเคลื่อนที่ที่มติดอกทางการขึ้นรูป)

การควบคุมแกนพิกัดของเครื่อง E.D.M. นั้น จะแตกต่างจากเครื่องมือกลขึ้นรูปประเภทตัด เช่น เครื่องกัด (milling machine) กล่าวคือ การส่งป้อนแกนพิกัดตามธรรมชาติภายใต้คำสั่งจากอุปกรณ์ระบบ NC นั้นไม่เพียงพอ

ถึงแม้ว่าจะได้รับคำสั่งแบบเดียวกับเครื่องมือกลขึ้นรูปประเภทตัด เช่น "จงเคลื่อนที่ไปทางข้างหน้า 10 มิลลิเมตร" ก็ตาม ถ้าเพียงแต่ทำตามคำสั่งคือ เลื่อนแกนพิกัดในการขึ้นรูปไปข้างหน้าเพียงอย่างเดียว ขั้วไฟฟ้ากับชิ้นงานจะสัมผัสกัน (ระยะระหว่างขั้วกลายเป็น 0) ทำให้เกิดการลัดวงจรคือ ไม่สามารถเริ่มการสปาร์คขึ้นได้

การขึ้นรูปด้วยวิธีการสปาร์คนั้น ระยะระหว่างขั้วที่ถูกต้องสมบูรณ์พอที่จะทำให้ เกิดการสปาร์คได้ จะถูกกำหนดตามพลังงานการขึ้นรูป หรือพื้นที่การสปาร์คที่ถูกกำหนดตั้งเอาไว้ ดังนั้นจำเป็นต้องควบคุมปริมาณการส่งป้อนของแกนพิกัดให้ระยะดังกล่าวนี้คงที่ อยู่เสมอ ตลอดเวลาที่ทำการขึ้นรูป

ถ้าเกิดการสปาร์คอย่างราบรื่นตลอดเวลาที่การขึ้นรูปกำลังดำเนินอยู่ ระยะระหว่างขั้วจะเปิดห่างออกเรื่อย ๆ จึงต้องมีการควบคุมให้ระยะระหว่างขั้วคงที่อยู่เสมอ โดยการส่งป้อนแกนพิกัดให้สามารถทดแทนระยะที่ลัดเคลื่อนไป นอกจากนั้นแล้ว ในกรณีที่เศษผงซึ่งเกิดขึ้นระหว่างขั้วโดยการสปาร์คถูกขจัดระบายออกไปไม่เพียงพอและบรรยากาศระหว่างขั้วกลายเป็นบรรยากาศที่เกิดการสปาร์คซ้ำขึ้นได้ ซึ่งสภาวะเช่นนี้จะเปรียบเสมือน ระยะระหว่างขั้วแคบลง ดังนั้นต้องมีการควบคุมให้แกนพิกัดในการขึ้นรูปเคลื่อนที่ในทิศทางที่ แยกขั้วออกจากกัน

ระยะระหว่างขั้วนี้สามารถทราบได้โดยการวัดแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้ว หมายถึง แรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้ากับชิ้นงาน ซึ่งถ้าระยะระหว่างขั้วแคบลง (ขั้วไฟฟ้าเข้าใกล้เกินไป) แรงดันไฟฟ้าจะสูงขึ้น แต่ถ้าระยะกว้างขึ้น แรงดันจะต่ำลง จากความสัมพันธ์ที่ว่า แรงดันไฟฟ้าแปรผกผันกับระยะนั้น เราสามารถรู้ถึงระยะระหว่างขั้วได้ โดยการวัดแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้ว

5-2 ทฤษฎีการควบคุมเครื่อง NC-E.D.M.

ระบบควบคุมต่าง ๆ ของเครื่อง NC-E.D.M. นั้น สามารถที่จะอธิบายได้ดังต่อไปนี้ (ดูรูปประกอบ)

อุปกรณ์ระบบ NC จะรับข้อมูลเกี่ยวกับระยะระหว่างขั้วมาจากวงจรการสปาร์ค และส่งคำสั่งซึ่งกำหนดปริมาณการส่งป้อนของแกนไปยังวงจรควบคุมมอเตอร์ นอกจากนี้แล้วหน้าที่ของ NC ก็ยังมีการรับคำสั่งจากผู้ปฏิบัติการคุมเครื่องหรือบอกแสดงสภาพต่าง ๆ ของเครื่อง

วงจรสปาร์ค

เป็นวงจรที่สร้างพัลส์การสปาร์ค วงจรนี้จะเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้า ขึ้นงานและทำหน้าที่ป้อนจ่ายพลังงานในการขึ้นรูป ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้นก็คือ เครื่องที่ถูกผลิตขึ้นมาในปัจจุบันนี้ โดยส่วนมากจะใช้ทรานซิสเตอร์ P-MOS เป็นส่วนหัวใจสำคัญของวงจร ซึ่งสามารถควบคุมพัลส์ได้ละเอียดในหน่วยเวลาระดับ nsec

นอกจากนี้แล้ว คุณสมบัติพิเศษ ในการเริ่มไหลของกระแสไฟฟ้าการสปาร์ค นั้นจะมีความเร็วสูงคือ ขึ้นถึง 800 A ได้ภายในเวลาเพียง $1 \mu \text{ sec}$

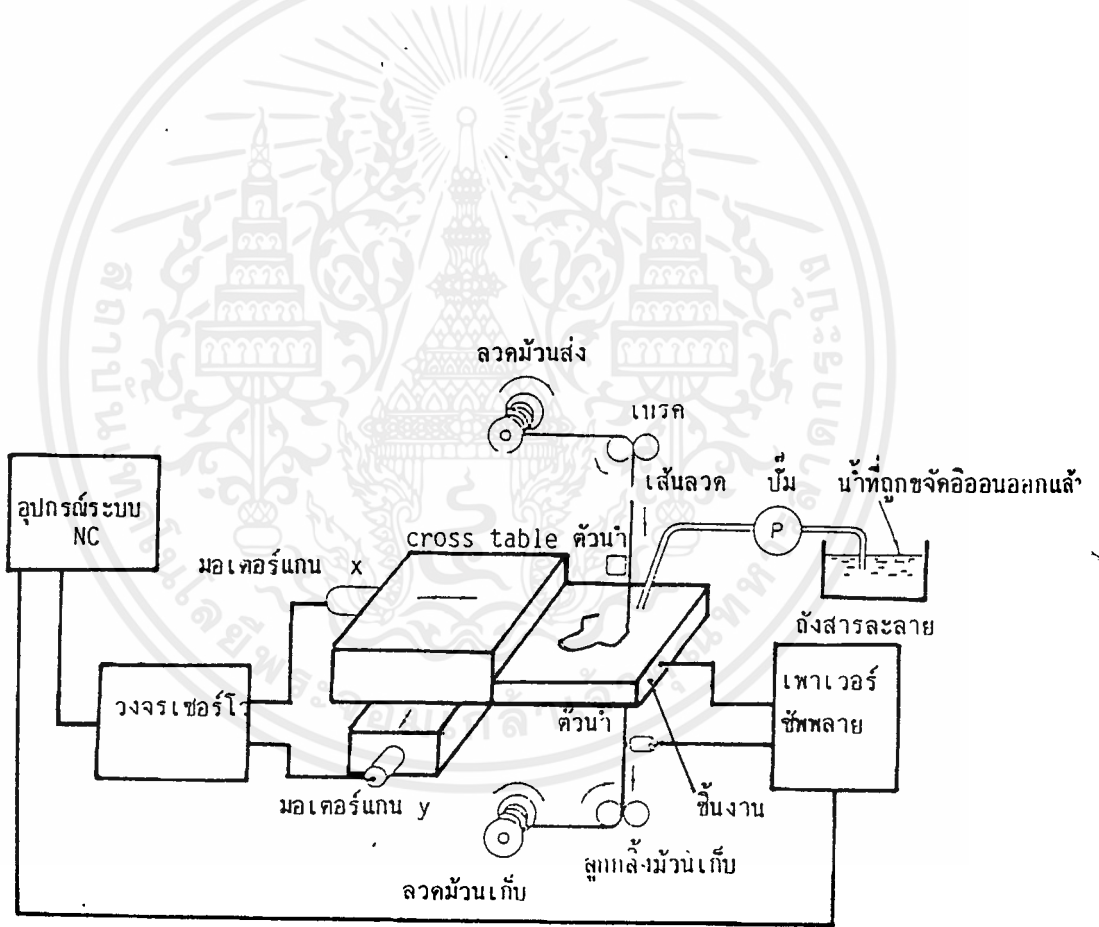
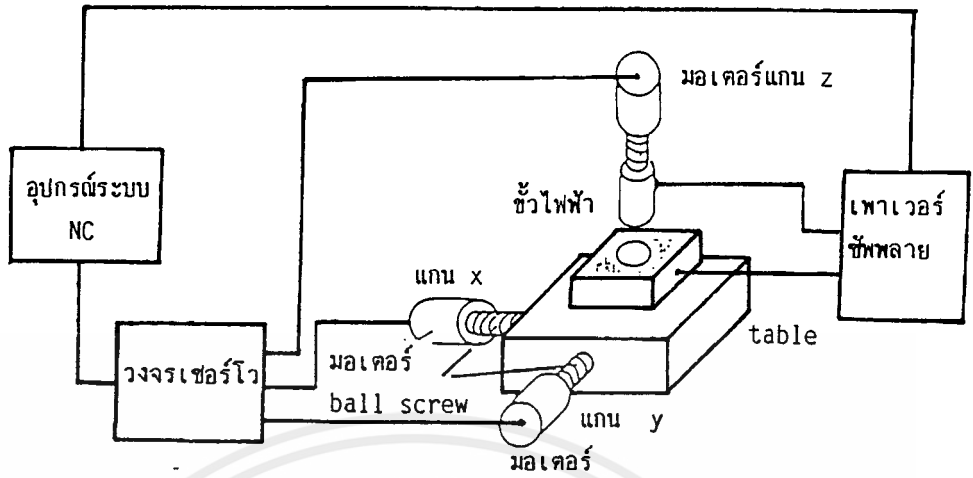
วงจรควบคุมมอเตอร์ (หรือเรียกอีกอย่างว่า motor driver)

ระบบควบคุมมอเตอร์ซึ่งรวมถึงมอเตอร์ด้วยนั้น เป็นส่วนที่สำคัญในการควบคุมเครื่อง ในปัจจุบัน เครื่องจักรในงานอุตสาหกรรมโดยส่วนมากจะใช้มอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนของการกำหนดตำแหน่ง การส่งป้อน

มอเตอร์ที่ถูกนำมาใช้งานดังกล่าวนี้ จะสตาร์ทและหยุดสลับกันไปบ่อยมากคุณสมบัติพิเศษในช่วงเริ่มสตาร์ทจึงมีอิทธิพลโดยตรงต่อระดับความละเอียดในการขึ้นรูป นอกจากนี้แล้วสมรรถนะการทำงานของวงจรควบคุมจะเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนด คุณสมบัติพิเศษในการควบคุม

อนึ่ง มอเตอร์ที่เหมาะสมจะนำมาใช้งานดังกล่าวนี้ จะต้องมีความสัมพันธ์พิเศษดังต่อไปนี้คือ

- หมุนได้ทั้งทวนและตาม เข็มนาฬิกา โดยที่คุณสมบัติพิเศษของสองทิศทางนี้เป็นสมมาตรกัน
- หยุดได้อย่างกระทันหัน



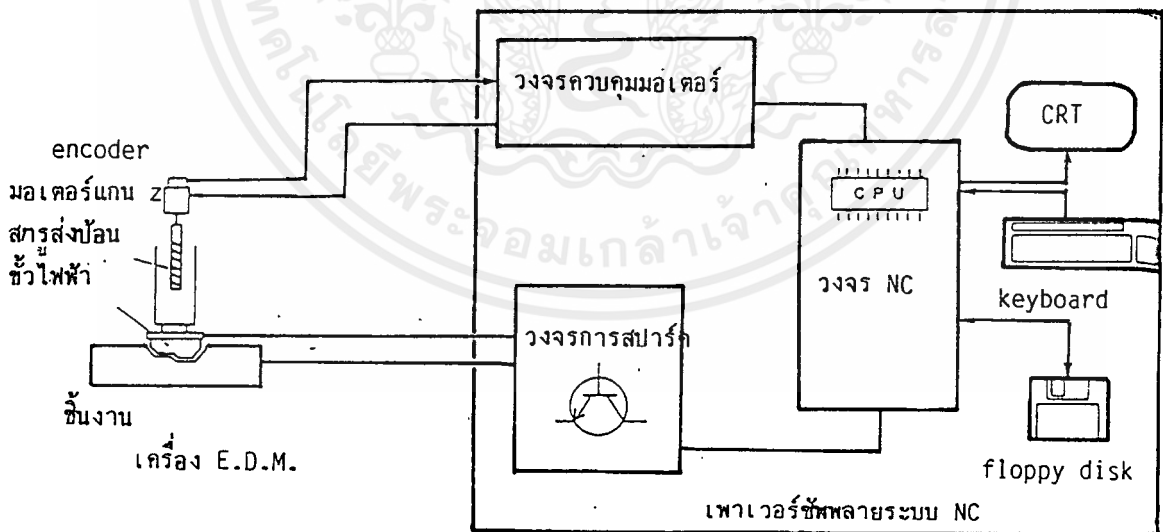
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แรงหมุนทั้ง starting torque และ holding torque มีค่ามาก
- โมเมนต์เฉื่อย (moment of inertia) ของตัวหมุน (rotor) มีค่าน้อย
- สามารถหมุนอย่างราบเรียบแบบความเร็วต่ำได้

มอเตอร์เหล่านี้ โดยทั่วไปมีชื่อเรียกว่า เซอร์โว มอเตอร์ ซึ่งมีหลายชนิด เช่น ฟิลล์มอเตอร์, สเต็ป มอเตอร์, DC.AC มอเตอร์ เครื่องมือกลในปัจจุบัน โดยส่วนมากใช้ DC, AC มอเตอร์เป็นหลัก

encoder

ตัว DC.AC มอเตอร์เองไม่สามารถรู้ถึงว่า "เคลื่อนที่ไปเท่าไร" ได้ หนึ่ง การที่จะควบคุมตำแหน่งหรือปริมาณการส่งป้อนของแกนพิกัดในการขึ้นรูปให้ได้ถูกต้อง นั้นจำเป็นที่จะต้องรู้ถึงปริมาณการเคลื่อนที่ของแกนอยู่ตลอดเวลา ซึ่งตามปกติแล้ว จะติดตั้งเครื่องตรวจวัดมุมการหมุน (rotary encoder) เข้าที่แกนของมอเตอร์ และใช้วิธีการส่งข้อมูลที่ตรวจวัดได้ ป้อนกลับ (feedback) ไปยังวงจรควบคุมมอเตอร์ เพื่อเปรียบเทียบปริมาณการเคลื่อนที่ ซึ่งถูกส่งไปยังมอเตอร์ ผลจากการเปรียบเทียบนั้น ถ้าค่าแตกต่างเป็น 0 แสดงว่ามอเตอร์ได้ทำงานตรงตามคำสั่ง



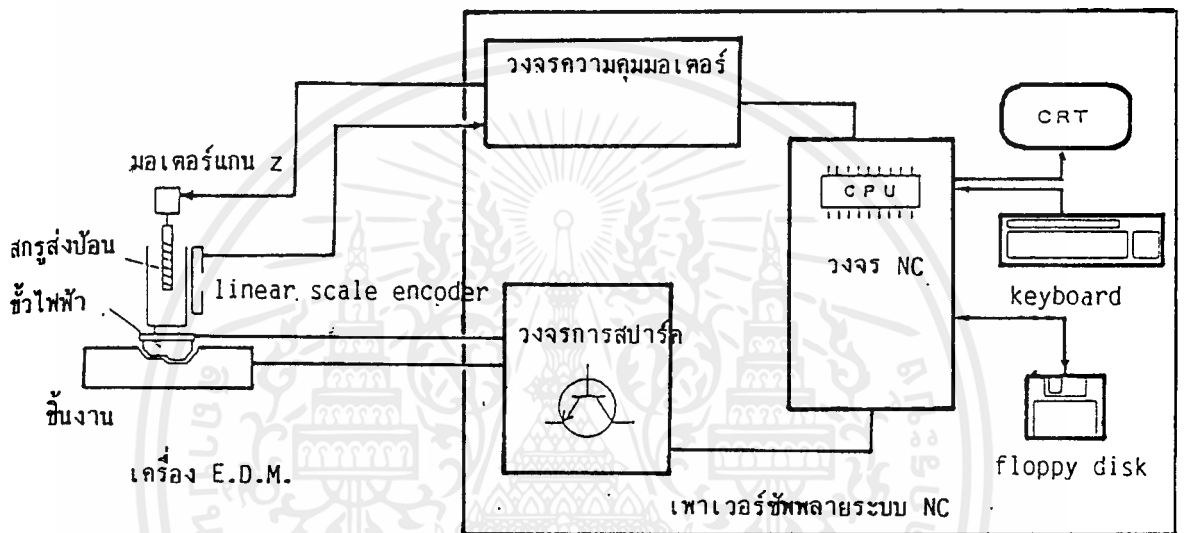
รูป 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

semi closed feedback

ในกรณีที่ค่า lead angle ของสกรูส่งป้อน และแรงเสียดทานทางกลของแท่งส่งป้อนมีค่าคงที่ เราสามารถถือได้ว่ามุมการหมุนของมอเตอร์ = ปริมาณการเคลื่อนที่ของแกนได้ ซึ่งหมายถึงว่า ถ้าควบคุมมุมการหมุนของมอเตอร์ได้ ก็สามารถนับได้ว่า แกนได้เคลื่อนที่ตามระยะที่กำหนด

วิธีการตรวจวัดตำแหน่ง และควบคุมเช่นนี้เรียกกันว่า "Semi closed feedback" เครื่องมือกลทุกวันนี้ โดยส่วนมากนำวิธีการนี้เข้ามาใช้



รูป 13

full closed feedback

ส่วนวิธีการอื่นซึ่งเรียกว่า "full closed feedback" นั้น จะใช้วิธีตรวจวัดปริมาณการเคลื่อนที่แท้จริงของแกนโดยตรง และส่งข้อมูลป้อนกลับ (feedback) ไปยังวงจรควบคุม เนื่องจากว่าแกนดังกล่าวจะเคลื่อนที่เป็นแนวเส้นตรง จึงจำเป็นที่จะติดตั้งเครื่องตรวจวัดตำแหน่ง (linear encoder) ที่เหมาะสมกับระยะชัก (stroke) ของเครื่องจักรชิ้นรูปนั้น ๆ ด้วย วิธีการเช่นนี้จะใช้กับเครื่องจักรชิ้นรูปที่ทำงานชิ้นรูปความละเอียดสูงในระดับ $1 \mu m$ หรือละเอียดกว่านั้น

วิธีการนี้ใช้การตรวจวัดตำแหน่งที่แท้จริงโดยตรง จึงสามารถกำหนดตำแหน่งได้อย่างถูกต้องมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี semi closed feedback แต่ใน

ทางกลับกันวิธีการนี้ก็ยังมียุทธศาสตร์ที่เหลือนอยู่อีก คือ ปัญหาการจัดหาช่องว่างสำหรับติดตั้ง linear encoder ปัญหาการตอบสนองช้าของระบบกลไกอื่นเนื่องมาจากน้ำหนักเฉื่อยของส่วนที่เคลื่อนที่ของแกน นอกจากนี้แล้ว คุณสมบัติพิเศษในการตอบสนองของระบบควบคุมโดยรวม จะมีแนวโน้มที่ไวเกินไปอันเนื่องมาจากความละเอียดในการตรวจวัดสูง จึงทำให้การปรับตั้งต่าง ๆ ทำได้ยาก

ผลสรุปก็คือ การใช้วิธีการนี้จะต้องลงทุนสูงกว่ามาก

อุปกรณ์ระบบ NC

อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์ระบบ NC จะมีความจำเป็นในการนำมาช่วยให้ควบคุมได้ทั้ง 2 อย่างคือ "การควบคุมพัลส์การสปาร์ค" และ "การควบคุมแกนพิกัดในการขึ้นรูป" การนำระบบ NC เข้ามาใช้กับเครื่อง E.D.M. ทำให้เครื่อง E.D.M. สามารถที่จะทำงานขึ้นรูปละเอียดได้

เราสามารถกล่าวได้ว่า CPU (Central Processing Unit) เป็นสมองของอุปกรณ์ระบบ NC ซึ่งในปัจจุบันมีการใช้ขนาด 16 bit เป็นหลัก แต่ทว่า แนวโน้มในปัจจุบันแสดงถึงว่า ระบบควบคุมจะถูกพัฒนาให้มีระดับสูงและซับซ้อนมากขึ้นไปอีก รวมทั้งจะมีการเพิ่มเติมฟังก์ชันต่าง ๆ เข้าไปด้วย ดังนั้น อุปกรณ์ระบบ NC ที่มีระดับสูง จะเริ่มมีการนำ CPU ขนาด 32 bit เข้ามาใช้แทน เพื่อที่จะให้ทำงานได้เร็วขึ้นเหมาะสมกับซอฟต์แวร์ ซึ่งมีปริมาณมากขึ้นด้วย

นอกจากนี้แล้ว อุปกรณ์ระบบ NC ยังทำให้ขอบเขตของวิธีการควบคุมกว้างขวางหรือมีอิสระมากขึ้นด้วย ถ้าเชื่อมต่ออุปกรณ์ระบบ NC เข้าระหว่างเซ็นเซอร์ (sensor) ซึ่งทำหน้าที่ตรวจวัดปรากฏการณ์กับส่วนที่เป็นกลไกการเคลื่อนที่ทำงาน เราก็สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงวิธีการควบคุมได้ เพียงแต่เปลี่ยนแปลงซอฟต์แวร์ที่สนับสนุนอุปกรณ์ระบบ NC เท่านั้น ดังนั้นจึงทำให้สามารถควบคุมระบบที่ซับซ้อนและมีระดับสูงได้ รวมทั้งควบคุมปรากฏการณ์ที่รวดเร็วมาก เช่น การสปาร์คได้ด้วย

เครื่องจักรในสมัยที่ผ่านมานั้น จะใช้วิธีผลิตลึงค์ หรือแคมขึ้นมาใหม่ และถ้ายังไม่เพียงพออาจจะต้องออกแบบใหม่เลย ดังนั้นอุปกรณ์ระบบ NC จะช่วยทำให้ขั้นตอนการพัฒนาซึ่งจะต้องมีการทดลองและผิดพลาด (TRY & ERROR) สลับกันไปจนกว่าจะสำเร็จให้เร็วขึ้นมากได้

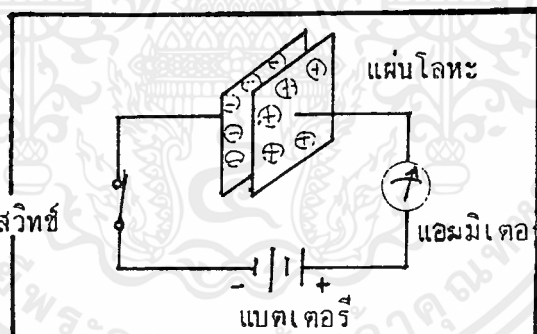
สำหรับวิธีการควบคุมนั้น จะอยู่ในรูปของซอฟต์แวร์ในตัวกลางเก็บบันทึก เช่น ROM (Read Only Memory) หรือ floppy disk ซึ่งซอฟต์แวร์เหล่านี้จะสนับสนุนอุปกรณ์ระบบ NC เราสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงหรือเพิ่มเติมฟังก์ชันเกี่ยวกับวิธีการควบคุมได้อย่างง่ายดาย โดยการสับเปลี่ยนตัวกลางเก็บบันทึกเท่านั้น และยังสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงให้เข้ากับความต้องการของผู้ใช้ (users) ได้อีกด้วย

6 บรรยากาศของระหว่างขั้ว

ระหว่างขั้ว (ระหว่างขั้วไฟฟ้ากับขั้วงาน) ที่จะทำให้เกิดการสปาร์คขึ้นนั้น จำเป็นต้องมีบรรยากาศอย่างไรบ้าง

6-1 คอนเดนเซอร์และความจุไฟฟ้าสถิตย์

ความสัมพันธ์ของประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ระหว่างขั้วนั้น ถ้าคิดเช่นเดียวกับหลักการของคอนเดนเซอร์ ก็จะทำให้เข้าใจได้ง่ายขึ้น คอนเดนเซอร์เป็นชิ้นส่วนทางไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถเก็บสะสมไฟฟ้าไว้ได้ชั่วคราวในช่วงระยะเวลาหนึ่ง



รูป 14 หลักการของคอนเดนเซอร์

เป็นที่ทราบกันว่า ถ้าจัดให้แผ่นโลหะ 2 แผ่น หันหน้าเข้าหากัน และต่อแบตเตอรี่ แอมมิเตอร์ สวิตช์ จะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านแอมมิเตอร์ทันทีในจังหวะที่เปิดสวิตช์

สาเหตุก็คือ อิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบ จะไหลจากขั้วลบของแบตเตอรี่ไปยังแผ่นโลหะของคอนเดนเซอร์ และขับไล่อิเล็กตรอนของแผ่นโลหะด้านบวกไปยังขั้วบวกของแบตเตอรี่ (การที่ขั้วบวของแอมมิเตอร์แกว่งขึ้น ไม่ได้เกิดขึ้นเพราะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านคอนเดนเซอร์ เราจะเห็นคล้ายกับมีกระแสไฟฟ้าไหล ในช่วงที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เท่านั้น)

และเมื่อแรงดันไฟฟ้าของระหว่างแผ่นโลหะเท่ากับแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ จะเกิดความสมดุลขึ้นกับแบตเตอรี่ ทำให้กระแสไฟฟ้าหยุดไหล (การชาร์ตไฟเสร็จสิ้นลง) หลังจากนั้นแล้ว ถึงแม้ว่าจะถอดแบตเตอรี่ออก ประจุไฟฟ้าก็จะยังคงเหลืออยู่ในคอนเดนเซอร์ความสามารถในการเก็บสะสมประจุไฟฟ้าเช่นนี้เรียกว่า ความจุไฟฟ้าสถิตย์ (ความจุของคอนเดนเซอร์)

องค์ประกอบที่จะกำหนดความจุไฟฟ้าสถิตย์นี้ มี 3 อย่าง

1. การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ของแผ่นโลหะ

ถ้าพื้นที่ใหญ่ขึ้น ก็สามารถเก็บสะสมประจุไฟฟ้าได้มากขึ้น

2. การเปลี่ยนระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะทั้งสอง

ถ้าระยะห่างแคบลง ความจุจะสูงขึ้น (แต่ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ทนทานได้จะต่ำลง)

3. การเปลี่ยนชนิดของสารไดอิเล็กตริก

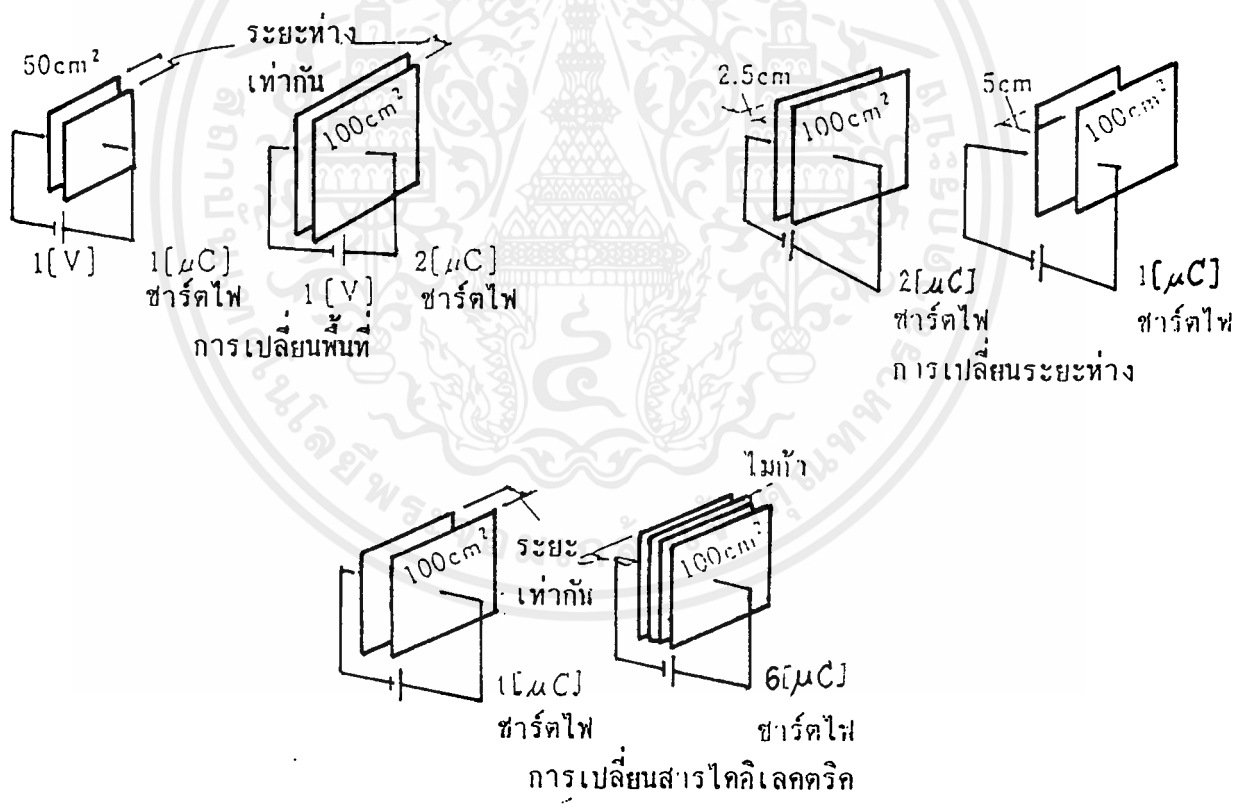
ความจุไฟฟ้าสถิตย์ จะมีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (ค่าความต้านทานของฉนวน) ของวัสดุ (สารไดอิเล็กตริก) ถ้าความต้านทานสูง ความจุก็จะสูงด้วย ในรูปที่อธิบายหลักการนั้นได้จัดวางแผ่นโลหะในอากาศ สารไดอิเล็กตริกก็คือ อากาศ หนึ่ง น้ำมันมีค่าความต้านทานสูงกว่าอากาศ จึงถูกใช้เป็นสารไดอิเล็กตริกในคอนเดนเซอร์ที่มีความจุสูงเสียเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเรียกกันว่า ออยล์-คอนเดนเซอร์ นอกจากนี้ยังมีไมก้าคอนเดนเซอร์ เปเปอร์-คอนเดนเซอร์ ซึ่งล้วนแต่ใช้ชื่อตามสารไดอิเล็กตริกทั้งสิ้น

6-2 ประจุไฟฟ้าของระหว่างขั้ว

ความสัมพันธ์ที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ถ้าจะนำมากล่าวในกรณีของระหว่างขั้วของเครื่อง E.D.M. ประจุไฟฟ้าของระหว่างขั้ว (ความจุไฟฟ้าสถิตย์) จะมีขนาดตามความสัมพันธ์ต่อไปนี้

1. ถ้าพื้นที่การสปาร์คมีขนาดใหญ่ ความจจะสูง
พื้นที่การสปาร์ค หมายถึง พื้นที่ของส่วนที่เกิดการสปาร์คขึ้นจริงระหว่างขั้วไฟฟ้า และชิ้นงานในฝั่งตรงกันข้าม
2. ถ้าระยะระหว่างขั้ว (ระยะห่างการสปาร์ค) แคบ ความจจะสูง
ถ้าระยะระหว่างขั้ว แคบ ความจุไฟฟ้าสถิตย์ ก็จะมีค่าสูงขึ้น
3. ถ้าค่าความต้านทานของสารไดอิเล็กตริก ซึ่งหมายถึง สารละลายที่ใช้กับเครื่อง E.D.M. สูง ความจจะสูง

โดยปกติแล้ว การสปาร์คจะเกิดขึ้นได้แม้แต่ในอากาศ แต่ในเครื่อง E.D.M. นั้น จะต้องใช้ของเหลว ซึ่งก็คือ ใช้ของเหลวเป็นสารไดอิเล็กตริกระหว่างขั้วไฟฟ้ากับชิ้นงานการขึ้นรูปด้วยเครื่อง E.D.M. นั้น จำเป็นต้องขจัดระบายเศษทางโลหะซึ่งเกิดจากการขึ้นรูปออกไป ดังนั้นของเหลวที่มีคุณสมบัติการไหลที่ดี จะเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นสารไดอิเล็กตริก ดังกล่าวนี้



รูปที่ 15 องค์ประกอบที่กำหนดความจุของคอนเดนเซอร์

6-3 ระยะห่างการสปาร์ค (ระยะระหว่างขั้ว)

ระหว่างขั้วไฟฟ้ากับชิ้นงานนั้น จำเป็นต้องมีระยะห่างขนาดหนึ่ง ถ้าใกล้เกินไป จะเกิดการสปาร์คแบบอาร์ค เช่นเดียวกับการเชื่อม หรือถ้าห่างกันเกินไป การสปาร์คก็จะไม่เกิดขึ้น ระยะห่างดังกล่าวนี้จะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการขึ้นรูป สภาพความสกปรกหรือสภาพการไหลของสารละลาย

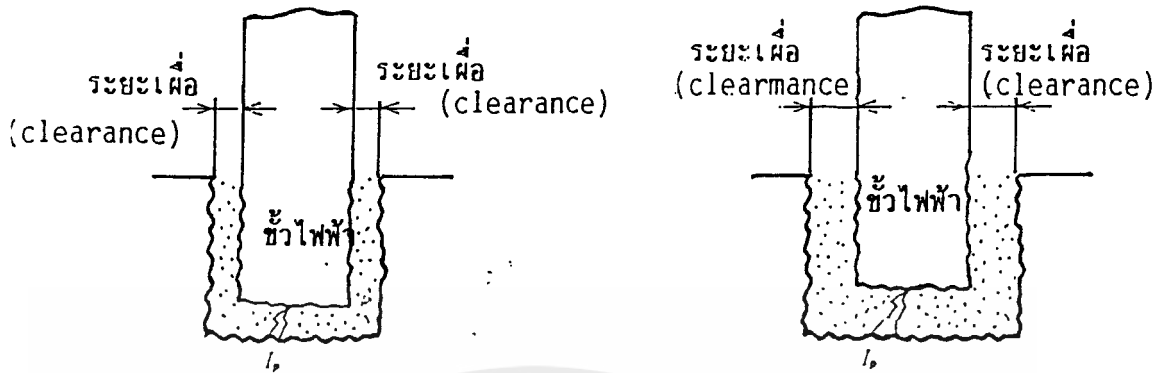
ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างการสปาร์คกับค่าความต้านทานของฉนวน

การที่จะขึ้นรูปด้วยเครื่อง E.D.M. ให้มีความละเอียดสูงนั้น จำเป็นที่จะต้องทำให้ขั้วไฟฟ้า เข้าใกล้ชิ้นงานให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อให้ระยะห่างการสปาร์คแคบลง เนื่องจากว่าพื้นที่การสปาร์คจะถูกกำหนดลงไปในโดยรูปทรงการขึ้นรูป ดังนั้น การที่จะขยับห่างการสปาร์คให้แคบลง ก็ควรที่จะเพิ่มค่าความต้านทานของฉนวนระหว่างขั้วให้สูงขึ้นด้วย

ค่าความต้านทานของฉนวนนั้น โดยทั่วไปแล้ว น้ำจะสูงกว่าอากาศ และน้ำมันจะสูงกว่าน้ำ เครื่อง E.D.M. จึงใช้น้ำมันมาตั้งแต่สมัยเริ่มแรก น้ำมันมีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าสูงถึงขนาดที่ถูกใช้เป็นน้ำมันฉนวนของหม้อแปลงขนาดใหญ่

ในกรณีที่ขึ้นรูปด้วยเครื่อง E.D.M. นั้น ถ้าค่าความต้านทานของสารไดอิเล็กตริก ระหว่างขั้วสูง (ค่าความต้านทานของสารละลายสูง) จะทำให้เกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนขึ้นได้ยาก ดังนั้นจึงต้องจัดวางให้ขั้วไฟฟ้า เข้าใกล้กับชิ้นงานมากขึ้น ผลที่ได้รับคือ เราสามารถขยับระยะห่างการสปาร์คให้แคบลงได้ ซึ่งจะมีผลดีสำหรับงานขึ้นรูปละเอียด

ในทางกลับกัน ถ้าใช้น้ำเป็นสารละลายในเครื่อง E.D.M. ค่าความต้านทานจะต่ำกว่าน้ำมัน ดังนั้น การสูญเสียความเป็นฉนวนของสารละลายจะเกิดขึ้นได้ง่ายใน ระยะที่ห่างกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมัน ซึ่งก็หมายความว่า ระยะห่างการสปาร์คจะกว้างขึ้น แต่ถ้าเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนและเกิดมีกระแสไฟฟ้า เริ่มไหลขึ้นแล้ว กระแสไฟฟ้าที่ไหลจะมีขนาดใหญ่ ตามส่วนที่ค่าความต้านทานต่ำลง ดังนั้นเราสามารถที่จะให้พลังงานระดับสูงได้ ซึ่งจะมีผลดีคือ สามารถที่จะใช้กับงานขึ้นรูปที่ต้องการความเร็วสูงได้



สารละลายประเภทน้ำมัน → ความต้านทานสูง สารละลายประเภทน้ำ → ความต้านทานต่ำ
 → ระยะห่างการสปาร์ค แคบ → ระยะห่างการสปาร์ค กว้าง

รูป 16 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างการสปาร์ค กับค่าความต้านทานของฉนวน

7 สารละลายที่ใช้กับเครื่อง E.D.M.

การขึ้นรูปด้วยเครื่อง E.D.M. นั้น จำเป็นต้องใช้ฉนวนที่ระหว่างขั้วไฟฟ้ากับชิ้นงาน (ระหว่างขั้ว) ซึ่งเรื่องนี้ได้อธิบายก่อนหน้านี้อแล้ว ปรากฏการณ์การสปาร์คจะเกิดขึ้นได้แม้แต่ในอากาศหรือในสุญญากาศ แต่ถ้าความต้านทานของฉนวนระหว่างขั้วมีค่าสูงเราก็สามารถที่จะทำให้เกิดการสปาร์คด้วยแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นได้ รวมทั้งสามารถย่นระยะห่างขั้วให้แคบลงได้อีกด้วย

ถ้าจะพูดในทางกลับกัน การที่จะสร้างระยะห่างการสปาร์คที่แคบมาก ๆ ราว $1/10 - 1/1000$ mm และทำให้เกิดการสปาร์คซึ่งได้ผลดีในการขึ้นรูปชิ้นในระหว่างขนาดนั้น เราจำเป็นที่จะต้องใช้ฉนวนระหว่างขั้วที่มีค่าความต้านทานที่สูง

ในการขึ้นรูปด้วยเครื่อง E.D.M. เราจำเป็นที่จะต้องสร้างให้ระยะห่างการสปาร์คแคบ เพื่อที่การขึ้นรูปจะได้มีความละเอียดสูง ดังนั้น ฉนวนระหว่างขั้วที่มีค่าความ

ด้านทานสูงกว่า จะใช้ได้ผลดีกว่า โดยทั่วไปแล้ว ค่าความต้านทานของน้ำจะสูงกว่าอากาศ และน้ำมันจะสูงกว่าน้ำ นอกจากนั้นแล้ว ของเหลวเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติการไหลดี จึงเหมาะสมที่สุดสำหรับใช้เป็นฉนวนของเครื่อง E.D.M. ดังนั้น น้ำมันจึงถูกใช้เป็นฉนวนในเครื่อง E.D.M. มาตั้งแต่สมัยเริ่มแรก

โดยทั่วไปแล้วค่าความต้านทานของน้ำจะสูงกว่าอากาศ และน้ำมันจะสูงกว่าน้ำ จึงทำให้สามารถย่นระยะห่างการสปาร์คให้แคบลงได้

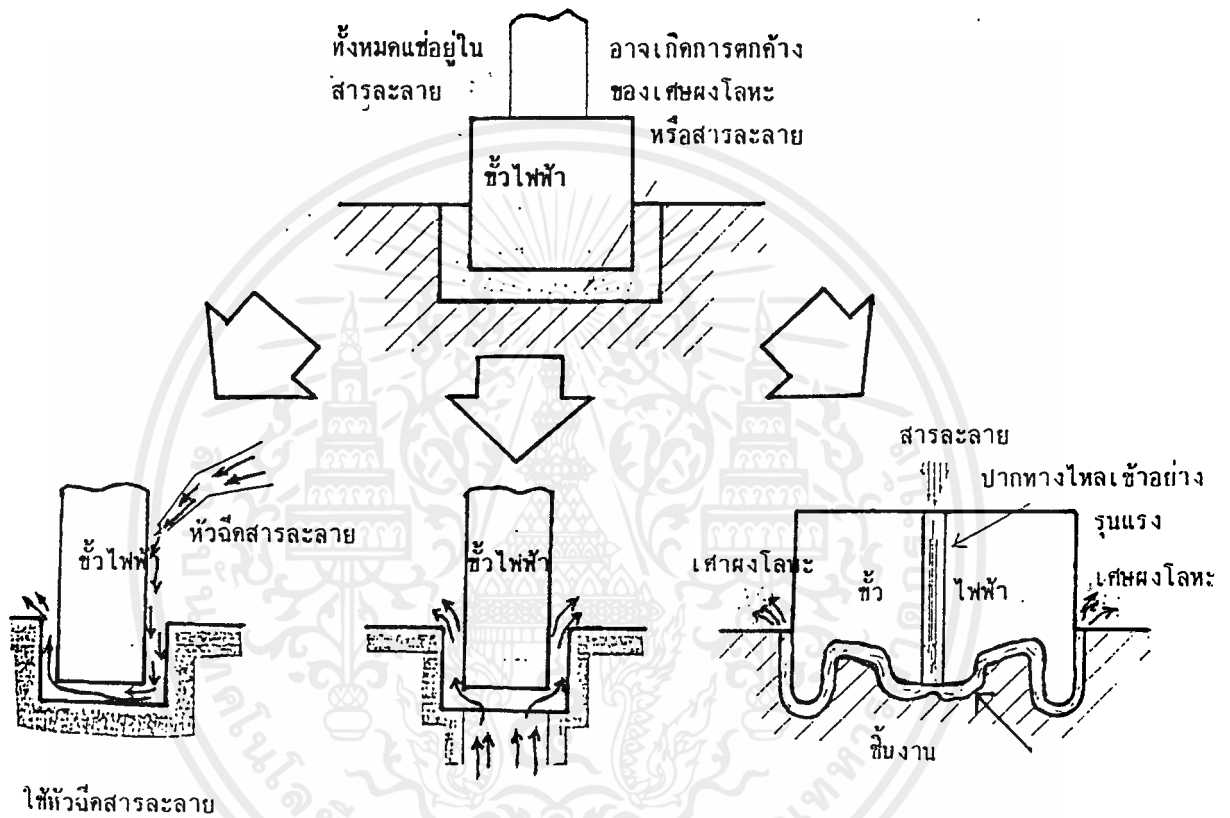
7-2 สารละลายที่สกรปรกจากการใช้งาน

ในเวลาเดียวกัน สารละลายยังทำหน้าที่อื่นอีกอย่างหนึ่งก็คือ ทำให้เกิดก๊าซความดันสูงเพื่อที่จะอัดดันให้ส่วนที่หลอมละลายของชิ้นงานหลุดกระเด็นออกไป ซึ่งได้อธิบายมาแล้วในเรื่องของทฤษฎีการสปาร์ค

นอกจากนั้นแล้ว วัสดุหลอมละลายที่ถูกดันให้หลุดออกมานั้น จะถูกสารละลายนี้ ทำให้เย็นตัวลงอย่างกระทันหัน และกลายเป็นเม็ดผงที่เล็กมาก ๆ (เศษผงโลหะที่เกิดจากการขึ้นรูป) เศษผงโลหะเหล่านี้จะทำให้ระหว่างขั้วสกรปรก ซึ่งเป็นอุปสรรคกีดขวางการเกิดการสปาร์คที่สมบูรณ์ ดังนั้น การรักษาสภาพแวดล้อมของการสปาร์คที่ระหว่างขั้วให้ที่อยู่เสมอจึงเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งเราสามารถทำได้ด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น ใช้หัวฉีดทำให้สารละลายเกิดการไหลอย่างรุนแรง เพื่อที่จะล้างขจัดเศษผงเหล่านี้ออกไปจากระหว่างขั้ว

ดังนั้น การขจัดระบายเศษผงโลหะออกไปดังที่กล่าวมานี้ ก็เป็นหน้าที่อื่นสำคัญของสารละลายเช่นกัน

สารละลายที่ผ่านการใช้งานนั้น จะสกรปรกขึ้นเรื่อย ๆ เครื่อง E.D.M. จึงมีการใช้ระบบส่งจ่ายสารละลายแบบหมุนเวียน ตลอดเวลาระหว่างการขึ้นรูป โดยที่สารละลายที่สกรปรกจากการใช้งานจะถูกส่งกลับไปไปยังถังส่งจ่ายสารละลาย เพื่อผ่านการกรองด้วยฟิลเตอร์ และใช้ปั๊มในการส่งมายังถึงชิ้นรูปของเครื่องอีกครั้ง



รูป 17 การใช้สารละลายในการบริหารจัดการเศษผงโลหะออกไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7-3 สารละลายประเภทน้ำมันและสารละลายประเภทน้ำ

สารละลายประเภทน้ำมัน มีค่าความต้านทานสูง จึงสามารถที่จะย่นระยะระหว่างขั้วให้แคบลงมาก ๆ ได้ แต่กระแสไฟฟ้าที่ไหลจะมีขนาดใหญ่ ดังนั้นโดยทั่วไปแล้วความเร็วในการขึ้นรูปจึงต่ำ แต่ในทางกลับกัน ผิวการขึ้นรูปจะละเอียด

ส่วนสารละลายประเภทน้ำมัน ถ้าในสภาวะปกติแล้ว จะมีปริมาณไอออนผสมอยู่มาก จึงมีค่าความต้านทานต่ำ เวลาที่จะขึ้นรูปก็จำเป็นต้องผ่านกระบวนการทำให้ความต้านทานสูงขึ้น ด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น วิธีการสับเปลี่ยนไอออน (ion exchange) การขึ้นรูปโดยปกติ นั้น โดยส่วนมากจะตั้งกำหนดให้อยู่ในช่วง $50,000 - 100,000 \Omega / \text{cm}$

เนื่องจากว่าน้ำมันมีค่าความต้านทานต่ำกว่าน้ำมัน จึงสามารถทำให้กระแสไฟฟ้าการขึ้นรูปโดยเฉลี่ยมีขนาดใหญ่ได้ ความเร็วในการขึ้นรูปจึงสูง แต่ในทางกลับกัน ความละเอียดของการขึ้นรูปขั้นสุดท้าย โดยปกติจะต่ำกว่าน้ำมัน คุณสมบัติพิเศษเหล่านี้ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกัน จะเห็นได้ว่า น้ำ และน้ำมันมีคุณสมบัติกลับกันดังตารางต่อไปนี้

	ประเภทของสารละลาย	
	น้ำ	น้ำมัน
ความเร็วในการขึ้นรูป	สูง	ต่ำ
ความหยาบของผิวที่ได้	หยาบ	ละเอียด

เครื่อง E.D.M. ประเภท diesinking โดยส่วนมากจะใช้สารละลายประเภทน้ำมัน ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ในทางตรงกันข้าม เครื่อง E.D.M. ประเภท wire cut โดยทั่วไปจะใช้น้ำ การเลือกประเภทสารละลายที่ใช้กับเครื่อง E.D.M. ประเภทต่าง ๆ ดังกล่าวนั้น จะเป็นการปฏิบัติตามที่เคยปฏิบัติกันมาเสียมากกว่า แต่อย่างไรก็ตามบริษัท โชดิกส์ ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการเลือกใช้สารละลายเพื่อที่จะได้สามารถใช้ประ

โดยชนของคุณสมบัติพิเศษของสารละลายแต่ละประเภทให้เหมาะสมและได้ผลมากที่สุด โดยไม่ได้ความคิดหรือวิธีการที่เคยปฏิบัติกันมาเป็นข้อจำกัด ซึ่งก็ได้ประสบผลสำเร็จในการพัฒนาเทคโนโลยีที่ไม่เคยปรากฏในที่อื่นมาก่อนดังต่อไปนี้

7-4 เครื่อง E.D.M. ประเภทความเร็วสูงมาก ซึ่งใช้สารละลายประเภทน้ำ (EDMill)

เครื่อง E.D.M. (EDMill) ใช้สารละลายประเภทน้ำ และเพิ่มแรงกระแทกของการสปาร์คระหว่างขั้ว รวมทั้งสามารถทำให้กระแสไฟฟ้าการขึ้นรูปที่มีขนาดใหญ่ไหลได้ ซึ่งผลที่ได้ก็คือ เครื่อง E.D.M. ประเภทนี้สามารถขึ้นรูปได้ด้วยความเร็วที่สูงกว่าเครื่อง E.D.M. ที่ใช้สารละลายประเภทน้ำมันถึง 2-10 เท่า เพียงแต่ว่าความหนาของผิวที่ได้ปัจจุบันจะมีค่าที่สูงสุดในระดับ $20 \mu \text{Rmax}$ แต่ในอนาคตอันใกล้มีแนวโน้มที่จะพัฒนาให้ถึงระดับ $10 \mu \text{Rmax}$ ได้

7-5 เครื่อง Wire Cut E.D.M. ประเภทความละเอียดสูงมาก ซึ่งใช้สารละลายประเภทน้ำมัน (AP series)

โดยปกติแล้ว จะใช้น้ำเป็นสารละลายในเครื่อง E.D.M. ประเภท wire cut แต่เครื่อง E.D.M. ประเภท wire cut บางรุ่นก็สามารถใช้สารละลายประเภทน้ำมันนอกเหนือไปจากน้ำได้อีก

การใช้สารละลายประเภทน้ำมัน ซึ่งมีความต้านทานสูงนั้น จะทำให้ขึ้นรูปได้ผิวที่ละเอียดกว่าน้ำ และยังได้มีการตรวจสอบอย่างแน่นอนแล้วว่า การใช้สารละลายประเภทน้ำมันจะมีผลดีได้แก่ บนผิวการขึ้นรูปจะมีชั้นแข็งตัวเกิดขึ้น อัตราส่วนการดึงเอาโคบอลต์ออกไปมีค่าที่ต่ำมาก ในปัจจุบันนี้ เครื่อง E.D.M. ที่ใช้น้ำก็ถูกพัฒนาให้ขึ้นจนสามารถขึ้นรูปได้ผิวที่ละเอียดใกล้เคียงกับน้ำมัน แต่อย่างไรก็ตาม ความแคบของระยะระหว่างการสปาร์ค ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติพิเศษความเป็นฉนวนของสารละลายนั้น สารละลายประเภทน้ำไม่สามารถที่จะเลียนแบบน้ำมันได้อย่างแน่นอน ยกตัวอย่างเช่น ใช้ลวดทั้งสแตนเลสที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.025 mm ก็สามารถที่จะขึ้นรูปเบร็องยาว (slit) ซึ่งมีความกว้าง 0.03 mm ได้โดยระยะห่างการสปาร์คมีเพียงข้างละ $2.5 \mu \text{ m}$ เท่านั้น

นอกจากนั้นแล้ว บริษัทที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ ได้มีการตั้งหัวข้อการพัฒนาเทคโนโลยีเกี่ยวกับว่า ทำอย่างไรจึงจะสามารถปรับปรุงให้ปัจจัยที่ตัดของสารละลายแต่ละประเภทมีระดับที่สูงขึ้นได้

8 ขี้วไฟฟ้า

การขึ้นรูปประเภทตัด จะใช้เครื่องมือ เช่น cutting tool, eng mill สำหรับตัดขึ้นรูปชิ้นงาน ส่วนการขึ้นรูปด้วยวิธีการสปาร์คก็เป็นเช่นเดียวกันคือ จำเป็นต้องมีเครื่องมือสำหรับขึ้นรูปชิ้นงาน ในกรณีของการขึ้นรูปด้วยวิธีการสปาร์คนั้น อาศัยไฟฟ้าในการขึ้นรูป จึงเรียกเครื่องมือนี้ว่า "ขี้วไฟฟ้า"

โดยทั่วไปแล้ว การขึ้นรูปด้วยเครื่อง E.D.M. นั้น ขี้วไฟฟ้าจะมีรูปทรงเหมือนกับผลิตภัณฑ์ และชิ้นงานในการขึ้นรูป ซึ่งจะใช้เป็นพิมพ์ของผลิตภัณฑ์จะมีรูปทรงกลับกันตรงข้าม กล่าวคือ ส่วนที่ยื่นออกมาของขี้วไฟฟ้าก็จะตรงกับส่วนที่เป็นหลุมลงไปของชิ้นงาน การขึ้นรูปด้วยขี้วไฟฟ้าเช่นนี้เรียกกันว่า การขึ้นรูปประเภทถ่ายแบบ

8-1 วัสดุและคุณสมบัติพิเศษในการขึ้นรูปของขี้วไฟฟ้าทองแดง

คุณสมบัติในการขึ้นรูป (machinability) ค่อนข้างไม่ดีเล็กน้อย แต่มีความแข็งที่ต่ำ จึงนำมาขึ้นรูปได้ง่าย ราคาก็ไม่สูงนัก ถ้าชิ้นงานเป็นวัสดุประเภทเหล็กกล้า ก็สามารถที่จะทำการขึ้นรูปแบบไม่สึกหรอ (อัตราการสึกหรอของขี้วไฟฟ้าต่ำกว่า 1%) ได้ เพียงแต่ว่า ทองแดงมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวด้วยความร้อนที่สูง เวลาที่จะขึ้นรูปขึ้นสุดท้ายแบบละเอียดจึงจำเป็นต้องคอยระวังเกี่ยวกับอุณหภูมิที่สูงขึ้นของส่วนที่ขึ้นรูปด้วย ในประเภทนี้ ขี้วไฟฟ้าทองแดงถูกใช้มากที่สุด

กราไฟต์

คุณสมบัติในการขึ้นรูป (machinability) ดีมาก แต่เปราะ จึงจำเป็นต้องระวังมากในการใช้งาน การใช้ขี้วกราไฟต์สำหรับเครื่อง E.D.M. จะทำให้คุณสมบัติพิเศษของการขึ้นรูปด้วยวิธีสปาร์คดีมาก เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่น (อัตราการนำไฟฟ้าสูง จึงทำให้ I_p มีขนาดใหญ่ได้) เงื่อนไขที่ทำให้การขึ้นรูปดำเนินไปได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้นจะเป็นเงื่อนไขการขึ้นรูปที่มีอัตราการสึกหรอของขี้วไฟฟ้ต่ำ สำหรับการขึ้นรูปความเร็วสูงซึ่งกระแสไฟฟ้มีขนาดใหญ่ แต่มีอัตราการสึกหรอของขี้วไฟฟ้าสูง สำหรับการขึ้นรูปละเอียด ดังนั้น ขี้วกราไฟต์ จึงเหมาะสมกับงานขึ้นรูปความเร็วสูง เพียงแต่ว่า ในปัจจุบันได้มีการพัฒนากราไฟต์ที่มีความแข็งแรงสูงขึ้นมา ซึ่งได้ผ่านการปรับปรุงได้ทั้งด้านความ

เพราะ และอัตราการสึกหรอของขั้วไฟฟ้า ดังนั้น กราฟจึงได้ถูกนำมาพิจารณาในฐานะวัสดุทำขั้วไฟฟ้าอีกครั้งหนึ่ง

คอปเปอร์ทั้งสแตน

คุณสมบัติในการขึ้นรูป (machinability) ดีกว่าทองแดง ถ้านำมาทำเป็นขั้วไฟฟ้านี้จะใช้งานได้เป็นอย่างดีมีคุณสมบัติพิเศษในการขึ้นรูปที่ดีกว่าทองแดงเช่นกัน แต่ราคาสูงกว่าทองแดงประมาณ 40 เท่า ขั้วไฟฟ้าคอปเปอร์ทั้งสแตนนี้เหมาะสมกับการขึ้นรูปความละเอียดสูง การขึ้นรูปที่เน้นที่การสปาร์คมีขนาดเล็ก โดยเฉพาะถ้าเป็นการขึ้นรูปชิ้นงานที่เป็นโลหะผสมประเภทคาร์ไบด์นั้น ขั้วไฟฟ้าทองแดงจะมีอัตราการสึกหรอของขั้วไฟฟ้าที่สูง แต่ถ้าใช้ขั้วไฟฟ้าคอปเปอร์ทั้งสแตนจะทำให้สามารถลดอัตราการสึกหรอดังกล่าวให้เหลือราว 15% ได้ และได้คุณสมบัติพิเศษในการขึ้นรูปที่ต่อกด้วย

ซิลเวอร์ทั้งสแตน

คุณสมบัติต่าง ๆ คล้ายกับคอปเปอร์ทั้งสแตน แต่มีราคาสูงกว่าทองแดงประมาณ 40 เท่า ขั้วไฟฟ้าคอปเปอร์ทั้งสแตนนี้เหมาะสมกับการขึ้นรูปความละเอียดสูง การขึ้นรูปที่เน้นที่การสปาร์คมีขนาดเล็ก โดยเฉพาะถ้าเป็นการขึ้นรูปชิ้นงานที่เป็นโลหะผสมประเภทคาร์ไบด์นั้น ขั้วไฟฟ้าทองแดงจะมีอัตราการสึกหรอของขั้วไฟฟ้าที่สูง แต่ถ้าใช้ขั้วไฟฟ้าคอปเปอร์ทั้งสแตนจะทำให้สามารถลดอัตราการสึกหรอดังกล่าวให้เหลือราว 15% ได้ และได้คุณสมบัติพิเศษในการขึ้นรูปที่ต่อกด้วย

ทองเหลือง

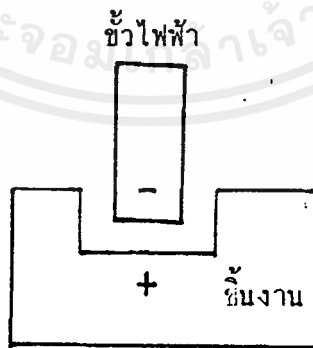
อัตราการสึกหรอของขั้วไฟฟ้าสูง และความเร็วในการขึ้นรูปต่ำ จึงไม่มีการใช้ขั้วทองเหลืองในเครื่อง E.D.M. แต่ทว่าทองเหลืองมีความเหนียวแน่น (ductility) ที่สูงและยังทนทานต่อแรงดึงได้ดีกว่าทองแดง จึงนิยมใช้เป็นวัสดุทำขั้วไฟฟ้าสำหรับเครื่อง E.D.M. ประเภท wire cut กันอย่างกว้างขวาง บริษัทผู้ผลิตวัสดุเส้นต่าง ๆ ได้มีการทดลองนำวัสดุอื่น เช่น อะลูมิเนียมมาผสมด้วย เพื่อปรับปรุงให้มีคุณสมบัติเกี่ยวกับแรงดึง การม้วนให้ขั้วลวดที่ทำจากทองเหลืองจะเป็นประเภทใช้แล้วทิ้ง เพราะว่ามีอัตราการสึก

หอรทสูง

สำหรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดที่ใช้กันโดยทั่วไปนั้น คือ ϕ 0.2 mm. แต่สำหรับงานขึ้นรูปความเร็วสูง จะใช้ขนาด ϕ 0.3 mm และสำหรับงานขึ้นรูปละเอียดจะใช้ขนาด ϕ 0.03 mm (ทำจากทั้งสแตน)

คุณสมบัติของขั้วไฟฟ้า และชิ้นงาน แยกตามวัสดุที่ทำ

วัสดุขั้วไฟฟ้า	วัสดุชิ้นงาน	ขึ้นรูปด้วยอัตราสัททหอรทของขั้วที่ต่ำ	ทิศทางขั้ว
ทองแดง	เหล็กกล้า	ได้	ตรงข้าม
ทองแดง	โลหะผสมคาร์ไบด์	ไม่ได้	ชิ้นงานเป็นบวท
คอปเปอร์ทั้งสแตน	เหล็กกล้า	ได้	ตรงข้าม
คอปเปอร์ทั้งสแตน	โลหะผสมคาร์ไบด์	ไม่ได้	ชิ้นงานเป็นบวท
ซิลเวอร์ทั้งสแตน	เหล็กกล้า	ได้	ตรงข้าม
ซิลเวอร์ทั้งสแตน	โลหะผสมคาร์ไบด์	ไม่ได้	ชิ้นงานเป็นบวท
กราไฟต์	เหล็กกล้า	ได้	ตรงข้าม
กราไฟต์	โลหะผสมคาร์ไบด์	ไม่ได้	ชิ้นงานเป็นบวท
ทองเหลือง	เหล็กกล้า	ไม่ได้	ชิ้นงานเป็นบวท



ทิศทางขั้วแบบชิ้นงานเป็นบวท
(ทิศทางขั้วแบบตรงข้าม คือ ทิศทางที่ชิ้นงานเป็นลบ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นผิวที่เกิดจากการขึ้นรูปโดยการสปาร์ค

การขึ้นรูปโดยการสปาร์คเป็นวิธีการขึ้นรูปโดยอาศัยพลังงานจากการสปาร์คไปทำให้ชิ้นงานบางส่วนมีอุณหภูมิสูงขึ้นและวัสดุเกิดการหลอมตัว ดังนั้นผิวของชิ้นงานส่วนที่ขึ้นรูปจะมีชั้นผิวเกิดการเปลี่ยนแปลง (Affected Zone) ขึ้น โดยทั่วไปเหล็กกล้าเมื่อหลอมตัวและถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว ถ้าใช้กล้องจุลทรรศน์ส่องดูหน้าตัดของด้านที่ผ่านการขึ้นรูปด้วย wire cut EDM จะเห็นเป็นสีขาวซึ่งเรียกว่า ชั้นสีขาว (White Zone) ชั้นสีขาวนี้เกิดจากโครงสร้าง Martensite ที่แตกตัวออกและโครงสร้าง Austenite ที่เหลือตกค้างอยู่ ส่วนใต้ของชั้นสีขาวแม้ว่าจะไม่ถูกหลอมตัวแต่ก็ได้รับความร้อนทำให้โครงสร้าง Martensite แตกตัวออกและแข็งตัวกลายเป็นชั้น Heat Affected Zone ขึ้น ซึ่งเราเรียกรวม White Zone และ Heat Affected Zone นี้ว่า ชั้นผิวเปลี่ยนแปลง (Affected Zone)

ชั้นผิวเปลี่ยนแปลงของการขึ้นรูปในสารละลายน้ำ

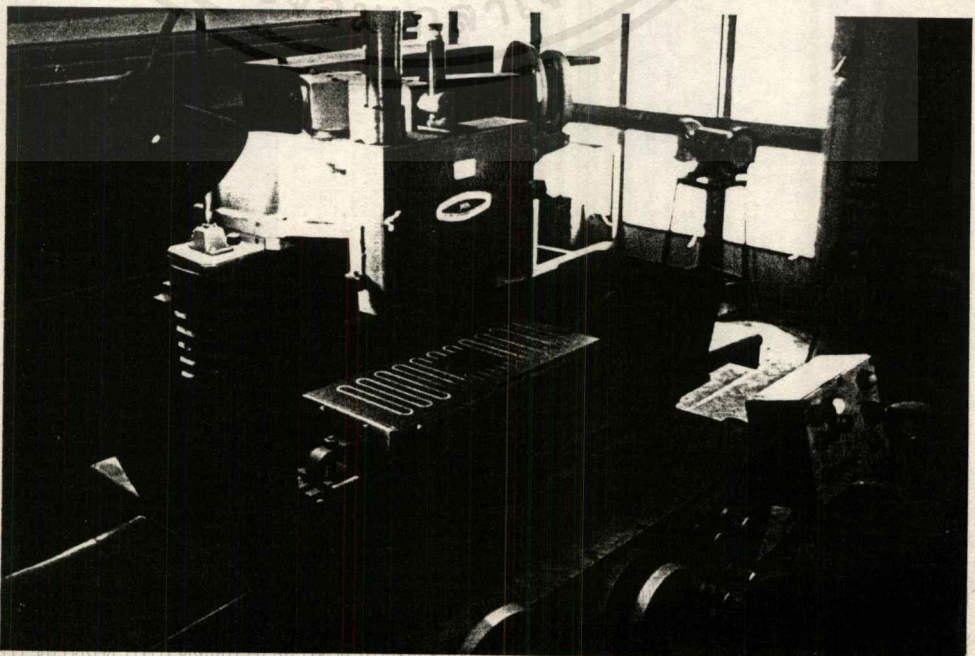
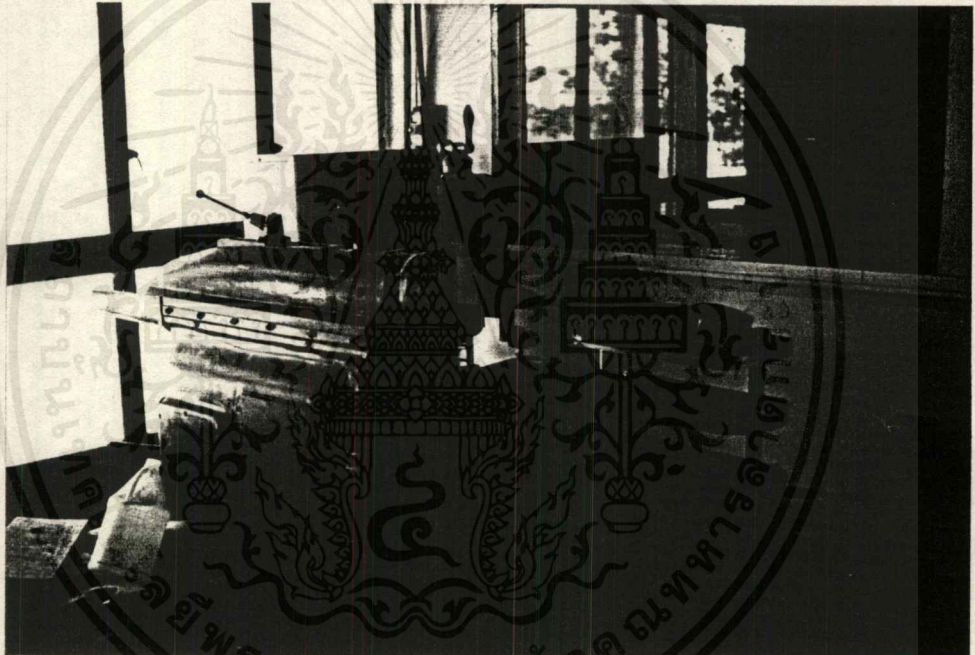
ผิวของเหล็กกล้าที่ถูกขึ้นรูปด้วยการสปาร์คในสารละลายน้ำความแข็งของผิวมีแนวโน้มที่จะอ่อนกว่าวัสดุเดิม นอกจากจะมีสาเหตุมาจากการตัดในสารละลายน้ำไม่มีการเกิด Carburization แล้ว ยังเกิดปรากฏการณ์แตกตัวของอ็อกไซด์ชั้นเล็กน้อยที่ผิวอันเนื่องมาจากค่าความต้านทานจำเพาะของน้ำซึ่งมีค่าต่ำ ดังนั้นบางส่วนของทองแดงที่ใช้ทำขั้วจะละลายหลุดออกไปรวมกับเหล็กกล้าเคลือบติดบนผิวทำให้ความแข็งของผิวลดลงได้ การขึ้นรูปในสารละลายน้ำนั้นนิยมใช้กันมากในการขึ้นรูปด้วยเครื่อง wire cut EDM ซึ่งเราจะพยายามไม่ให้เกิดการแยกตัวเป็นอ็อกไซด์ขึ้น โดยหาวิธีทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะของสารละลายน้ำให้สูงขึ้น แต่ค่าความต้านทานจำเพาะของน้ำเมื่อถูกความสกปรกของเศษโลหะจะทำให้ค่าความต้านทานลดต่ำลงได้ง่าย การที่จะทำค่าความต้านทานให้สูงกว่าปกติ (50,000 - 100,000 $\Omega \cdot \text{cm}$) จะทำให้การควบคุมดูแลค่าความต้านทานจำเพาะยุ่งยากขึ้น นอกจากนี้การป้องกันการเกิดปรากฏการณ์แยกตัวของอ็อกไซด์ยังมีการพัฒนาวงจรสปาร์คกระแสสลับเพื่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้ากลับ (Reverse Voltage) เข้าไปเลี้ยงวงจรในช่วงเวลาหยุดสปาร์ค (T_{off})

การเตรียมชิ้นงาน

ขั้นตอนที่ 1

นำเหล็ก SKD 11 ขนาดหน้าตัด 15*15 mm. มาทำการ machine ดั้งขึ้น
ต่อไป

1. นำแท่งเหล็กมาตัดให้ได้ขนาดความยาวมากกว่า 90 mm. เล็กน้อย
2. นำแท่งเหล็กไปทำการไสให้ได้ขนาดหน้าตัด 8*15 mm.
3. ทำการไสแท่งเหล็กอีกด้านจนได้ขนาดหน้าตัด 8*12 mm.
4. นำแท่งเหล็กที่ได้ไปเจียรระไนจนได้ขนาดหน้าตัด 6*10 mm.
5. ทำการปรับแต่งชิ้นงานด้านหัวและท้ายจนได้ชิ้นงานขนาด 6*10*90 mm.



ขั้นตอนที่ 2

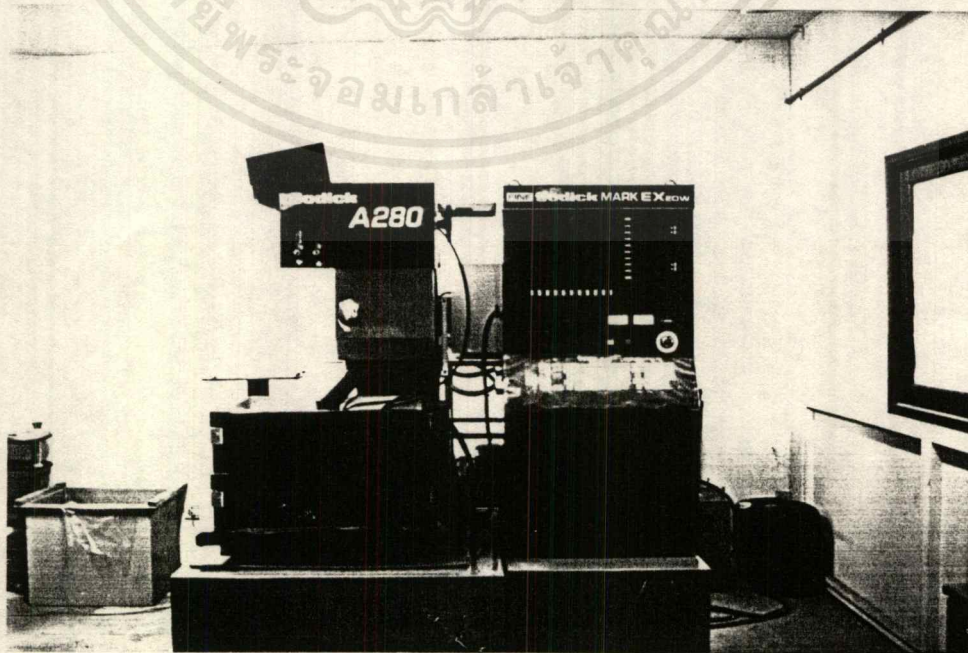
หลังจากทำการ machine จนได้ขนาดตามต้องการแล้ว นำชิ้นงานที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 1 ชม. แล้วปล่อยให้เย็นในเตาอบ

ขั้นตอนที่ 3

ตัดชิ้นงานแต่ละชิ้นด้วย wire cut EDM โดยตัดผ่าครึ่งชิ้นงานตามความยาวด้วยค่า I_p ต่างๆกัน จะได้ชิ้นงานขนาด $3*10*90$ mm.

ค่า Parameter ที่ใช้ในการตัด

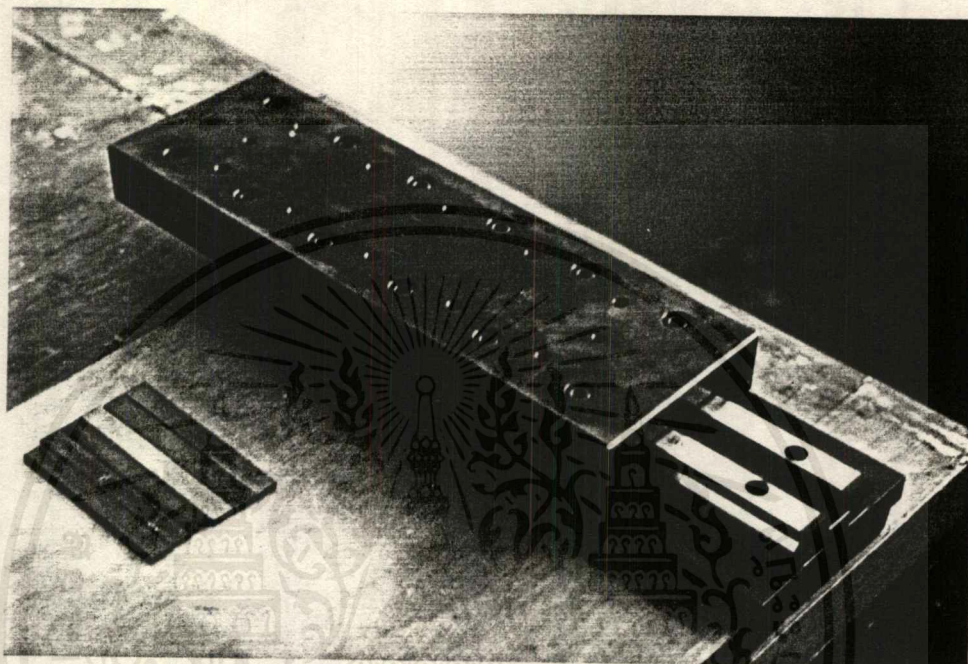
ON-OFF ($\mu\text{sec.}$)	I_p (A)	WIRE SPEED (cm/min)	TENSION (gf)
4 - 14	17	170	500
4 - 14	16	170	500
4 - 14	15	170	500
4 - 14	14	170	500



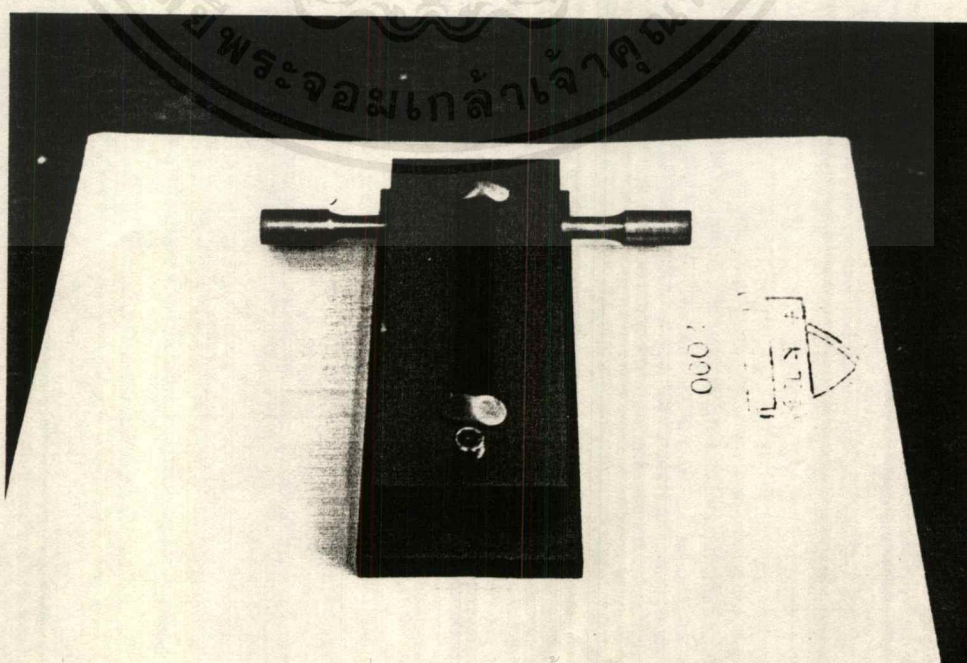
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

1. Slide-way เป็นตัวช่วยเลื่อนชิ้นทดสอบไป-มา เพื่อวัดค่าความโก่งที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ได้กำหนดไว้

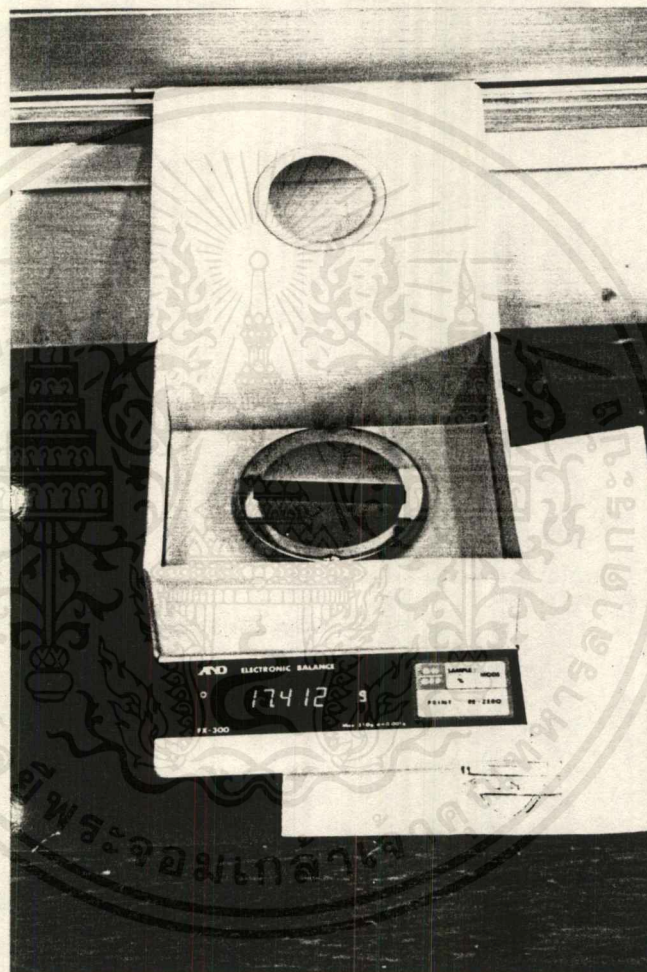


2. Base เป็นแผ่นเหล็กสองแผ่นประกบกันโดยมีแท่งเหล็กกลมเป็นแกน สามารถปรับระดับความลาดเอียงได้เพื่อช่วยวัดค่าความโก่งได้ง่ายขึ้น



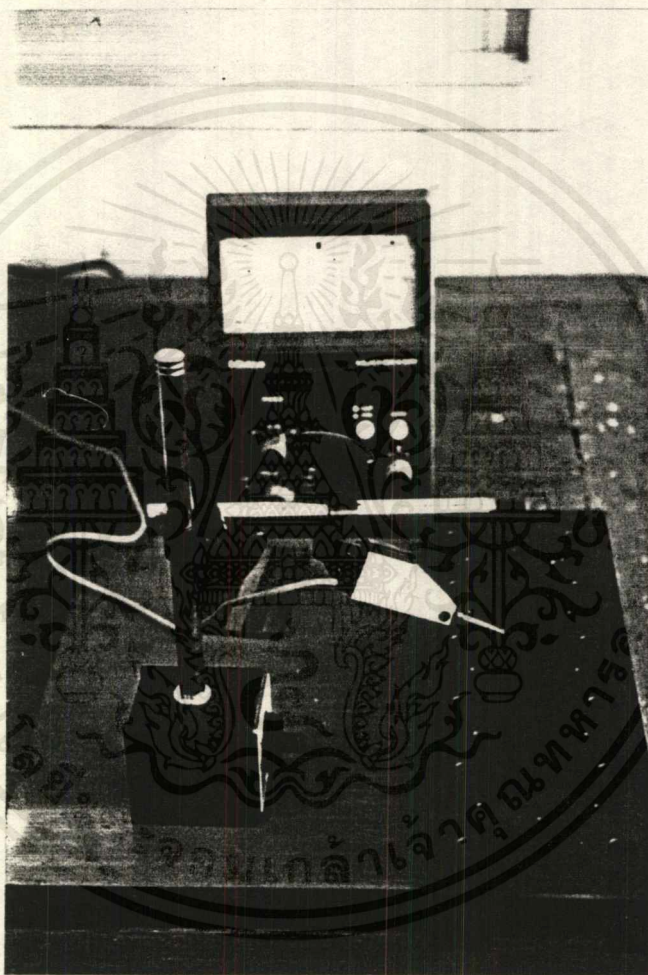
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เครื่องชั่ง เป็นเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์แสดงผลด้วยระบบดิจิทัล ใช้สำหรับชั่งน้ำหนักชั้นทดสอบ สามารถบอกความละเอียดได้ถึงระดับหน่วยมิลลิกรัม

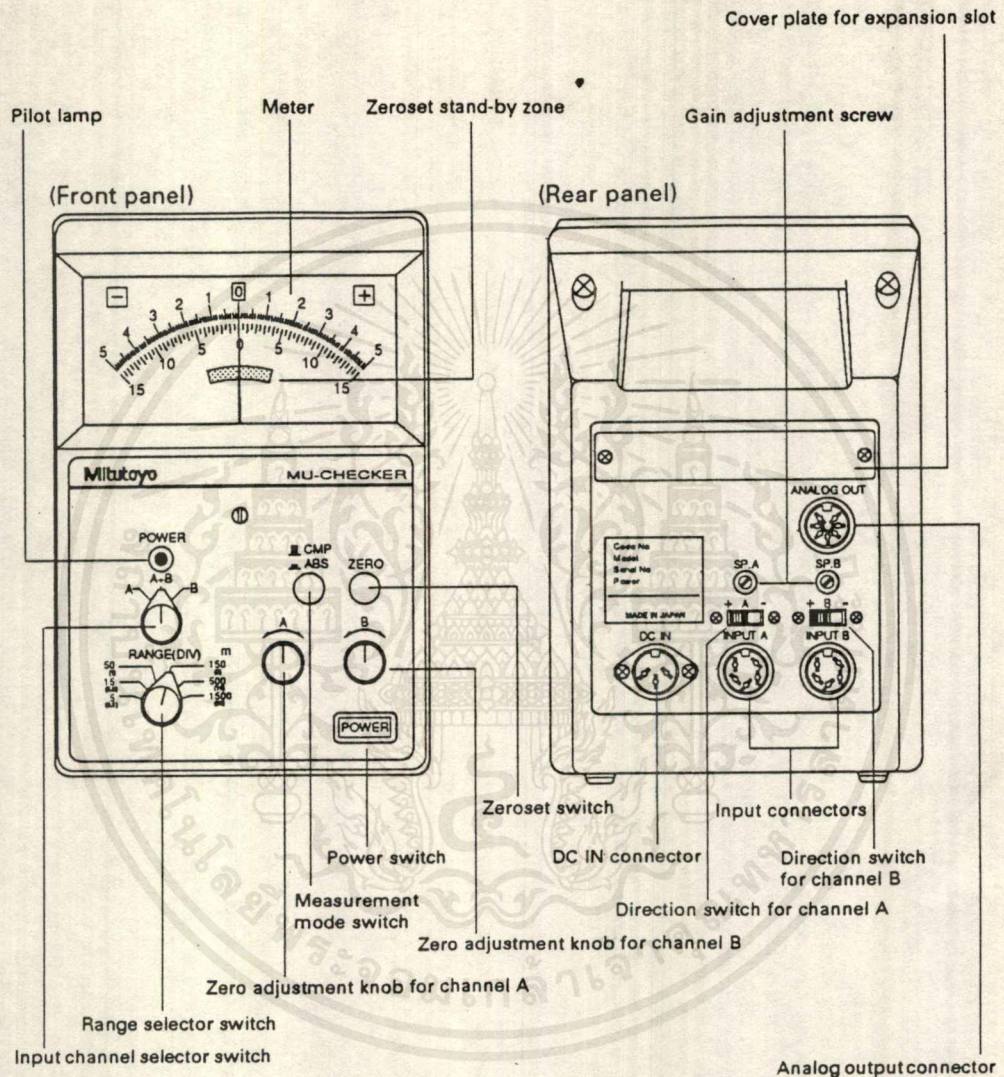


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เครื่องวัดความโค้ง หรือ MU-Checker ใช้วัดค่าความโค้งของชั้นทดสอบที่ตำแหน่งต่างๆที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งสามารถวัดได้ละเอียดถึง 0.1 m.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

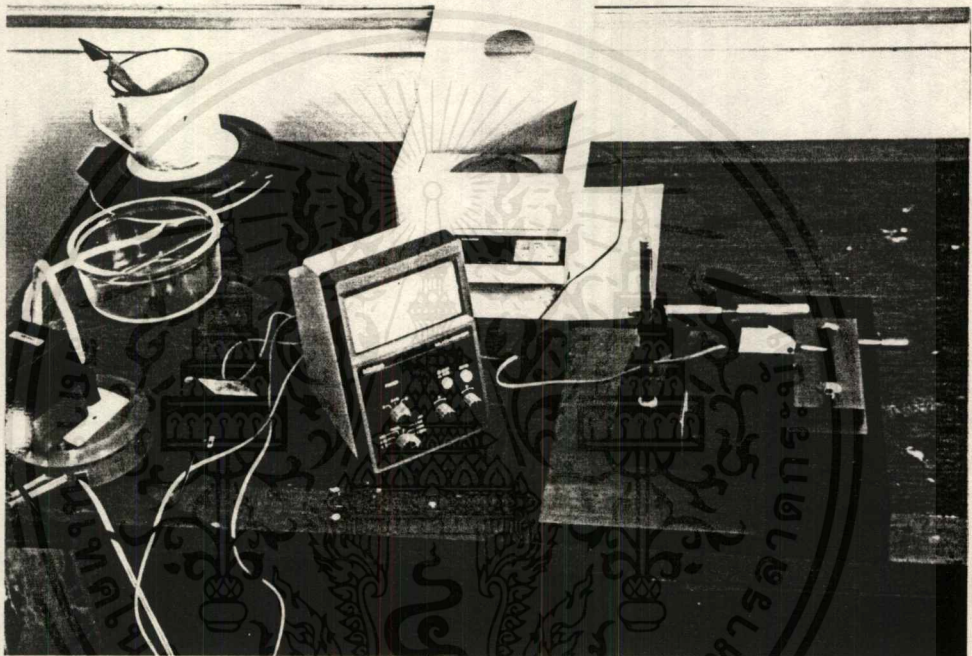


Differential Mu-Checker

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบ

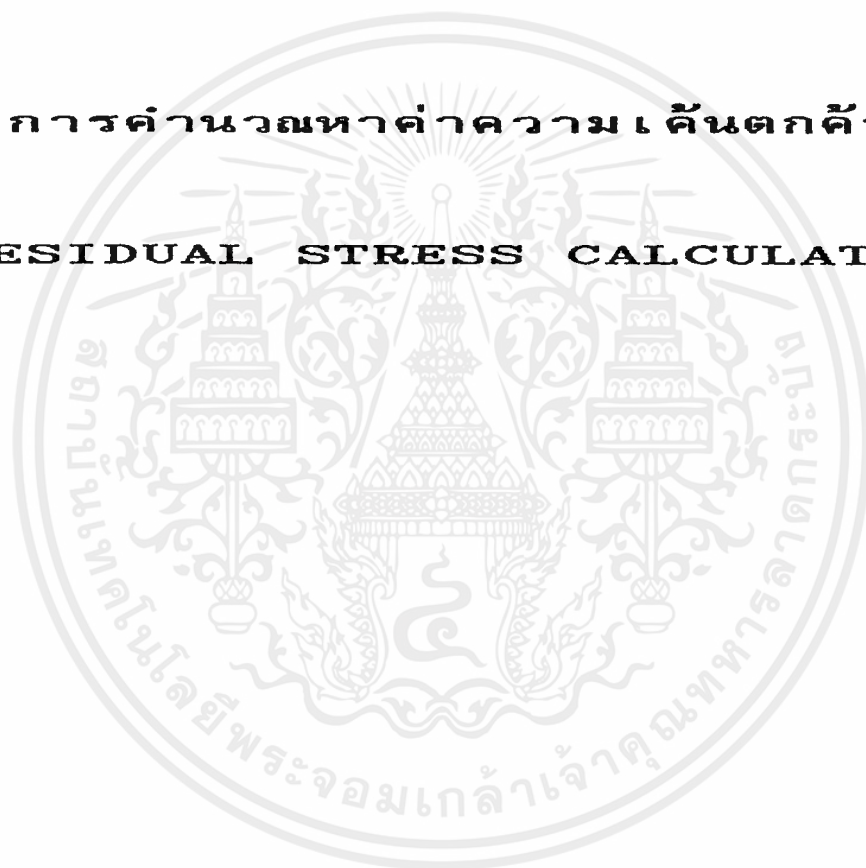
1. Lay out ตำแหน่งที่จะทำการวัดค่าความโก่ง (Deflection)
2. ทำความสะอาดชิ้นทดสอบไม่ให้มีคราบน้ำมันเคลือบติดอยู่
3. ทำการวัดขนาดความกว้าง ความยาวและความหนาของชิ้นทดสอบ โดยขนาดต่างๆ ที่ได้ๆ จากค่าเฉลี่ยจากการวัด 3 จุด
4. นำชิ้นทดสอบ ไปซึ่งน้ำหนักและวัดค่าความโก่ง



5. Coat ชิ้นทดสอบด้วย parafin ทุกด้าน ยกเว้นด้านที่ผ่านการตัดด้วย wire cut EDM
6. กัดชิ้นทดสอบที่ coat เรียบร้อยแล้วด้วยสารละลายกรดไนตริกความเข้มข้น 20% ซึ่งได้จากกรดไนตริกเข้มข้น 100% ปริมาตร 8 ส่วน กับ methyl alcohol 2 ส่วน
7. นำชิ้นทดสอบมาล้างด้วยน้ำแล้วแกะ parafin ออกเพื่อนำไปซึ่งน้ำหนักและวัดค่าความโก่ง
8. ทำการทดสอบ เช่นนี้ (4—>6) ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งค่าความโก่งที่วัดได้ไม่เปลี่ยนแปลง จึงจะหยุดทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาค่าความเค้นตกค้าง
RESIDUAL STRESS CALCULATION



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RESIDUAL STRESS CALCULATED FORMULA

$$\sigma_n = \frac{E}{L^2} \left[\frac{4}{3} \frac{(T - \sum_{i=1}^n \Delta t_i)^3 \Delta f_n}{(T - \sum_{i=1}^n \Delta t_i) \Delta t_n} - 4(T - \sum_{i=1}^n \Delta t_i) \sum_{i=1}^{n-1} \Delta f_i - \sum_{i=1}^{n-1} \left\{ \frac{4}{3} \frac{(T - \sum_{k=1}^i \Delta t_k)^2}{(T - \sum_{k=1}^{i-1} \Delta t_k)} \cdot \Delta f_i \right\} + \sum_{i=1}^{n-1} (4 \cdot \Delta f_i \cdot \sum_{k=i+1}^{n-1} \Delta t_k) \right]$$

σ_n : stress of n_{th} removed thin layer (kgf/mm²)

T : thickness after WEDM (mm)

L : gauge length (mm)

Δt_n : thickness of n_{th} removed thin layer (mm)

Δf_{n-1} : variation of deflection (mm)

E : elastic modulus (2.1*10⁴ kgf/mm²)

σ_n	1 (+)	2 (-)	3 (+)	4 (-)
$\sigma_1 = \frac{E}{L^2}$	$\frac{4}{3} \frac{(T - \Delta t_1)^3 \Delta f_1}{T \Delta t_1}$	0	0	0
$\sigma_2 = \frac{E}{L^2}$	$\frac{4}{3} \frac{(T - \sum_{i=1}^2 \Delta t_i)^3 \Delta f_2}{(T - \Delta t_1) \Delta t_2}$	$4(T - \sum_{i=1}^2 \Delta t_i) \cdot \Delta f_1$	$\frac{4}{3} \frac{(T - \Delta t_1)^2}{T} \cdot \Delta f_1$	$\Delta f_1 \sum_{k=2}^1 \Delta t_k = 0$
$\sigma_3 = \frac{E}{L^2}$	$\frac{4}{3} \frac{(T - \sum_{i=1}^3 \Delta t_i)^3 \Delta f_3}{(T - \sum_{i=1}^2 \Delta t_i) \Delta t_3}$	$4(T - \sum_{i=1}^3 \Delta t_i) \cdot \sum_{i=1}^2 \Delta f_i$	$\frac{4}{3} \frac{(T - \Delta t_1)^2}{T} \cdot \Delta f_1$ $+$ $\frac{4}{3} \frac{(T - \Delta t_1)}{(T - \Delta t_1)} \cdot \Delta f_2$	$\Delta f_1 \sum_{k=2}^2 \Delta t_k + \Delta f_2 \sum_{k=3}^2 \Delta t_k = (\Delta f_1 \Delta t_2) \cdot 4$

$\sigma_4 = \frac{E}{L^2}$	$\frac{4}{3} \cdot \frac{(T - \sum_{i=1}^4 \Delta t_i)^3}{(T - \sum_{i=1}^4 \Delta t_i)} \cdot \frac{\Delta f_4}{\Delta t_4}$	$4(T - \sum_{i=1}^4 \Delta t_i) \cdot \sum_{i=1}^3 \Delta f_i$	$\frac{4}{3} \frac{(T - \Delta t_1)^2}{(T - \sum_{k=1}^2 \Delta t_k)^2} \cdot \Delta f_1$ $+ \frac{4}{3} \frac{(T - \Delta t_1)}{(T - \sum_{k=1}^3 \Delta t_k)^2} \cdot \Delta f_2$ $+ \frac{4}{3} \frac{(T - \sum_{k=1}^2 \Delta t_k)}{(T - \sum_{k=1}^4 \Delta t_k)} \cdot \Delta f_3$	$\Delta f_1 \sum_{k=2}^3 \Delta t_k$ $+ \Delta f_2 \sum_{k=3}^3 \Delta t_k$ $+ \Delta f_3 \sum_{k=4}^3 \Delta t_k$ $= \{ \Delta f_1 (\Delta t_2 + \Delta t_3) + \Delta f_2 \Delta t_3 \} \cdot 4$
$\sigma_5 = \frac{E}{L^2}$	$\frac{4}{3} \cdot \frac{(T - \sum_{i=1}^5 \Delta t_i)^3}{(T - \sum_{i=1}^5 \Delta t_i)} \cdot \frac{\Delta f_5}{\Delta t_5}$	$4(T - \sum_{i=1}^5 \Delta t_i) \cdot \sum_{i=1}^4 \Delta f_i$	<p>above value +</p> $\frac{4}{3} \frac{(T - \sum_{k=1}^4 \Delta t_k)^2}{(T - \sum_{k=1}^5 \Delta t_k)} \cdot \Delta f_4$	$\Delta f_1 \sum_{k=2}^4 \Delta t_k$ $+ \Delta f_2 \sum_{k=3}^4 \Delta t_k$ $+ \Delta f_3 \sum_{k=4}^4 \Delta t_k$ $+ \Delta f_4 \sum_{k=5}^4 \Delta t_k$ $= \Delta f_1 (\Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4)$ $+ \Delta f_2 (\Delta t_3 + \Delta t_4)$ $+ \Delta f_3 \Delta t_4 \} \cdot 4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

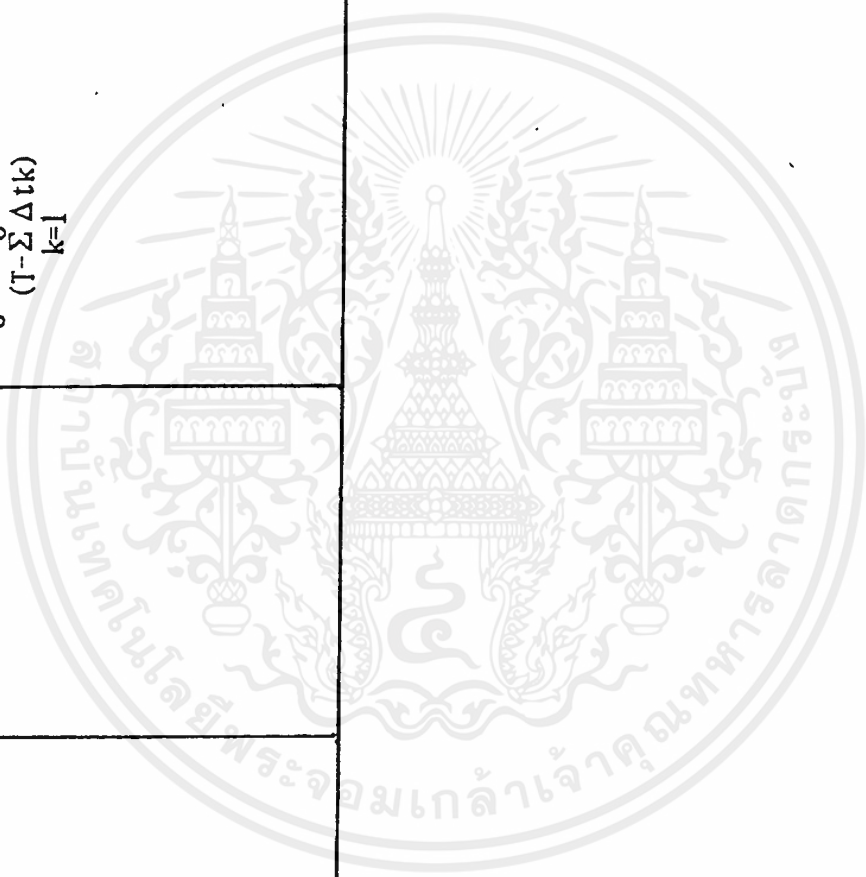
$\sigma_6 = \frac{E}{L^2}$	$\frac{4}{3} \cdot \frac{(\sum_{i=1}^6 \Delta t_i)^3}{(\sum_{i=1}^5 \Delta t_i)} \cdot \frac{\Delta f_6}{\Delta t_6}$	$4(T - \sum_{i=1}^6 \Delta t_i) \cdot \sum_{i=1}^5 \Delta f_i$	$\text{above value} + \frac{5}{4} \cdot \frac{(\sum_{k=1}^5 \Delta t_k)^2}{(\sum_{k=1}^4 \Delta t_k)} \cdot \Delta f_5$	$\begin{aligned} & \Delta f_1 \sum_{k=2}^5 \Delta t_k \\ & + \Delta f_2 \sum_{k=3}^5 \Delta t_k \\ & + \Delta f_3 \sum_{k=4}^5 \Delta t_k \\ & + \Delta f_4 \sum_{k=5}^5 \Delta t_k \\ & + \Delta f_5 \sum_{k=6}^5 \Delta t_k \\ & = \{ \Delta f_1(\Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5) \\ & + \Delta f_2(\Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5) \\ & + \Delta f_3(\Delta t_4 + \Delta t_5) \\ & + \Delta f_4 \Delta t_5 \} \cdot 4 \end{aligned}$
$\sigma_7 = \frac{E}{L^2}$	$\frac{4}{3} \cdot \frac{(\sum_{i=1}^7 \Delta t_i)^3}{(\sum_{i=1}^6 \Delta t_i)} \cdot \frac{\Delta f_7}{\Delta t_7}$	$4(T - \sum_{i=1}^7 \Delta t_i) \cdot \sum_{i=1}^6 \Delta f_i$	$\text{above value} + \frac{6}{4} \cdot \frac{(\sum_{k=1}^6 \Delta t_k)^2}{(\sum_{k=1}^5 \Delta t_k)} \cdot \Delta f_6$	$\{ \Delta f_1(\Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6) \\ + \Delta f_2(\Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6) \\ + \Delta f_3(\Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6) \\ + \Delta f_4(\Delta t_5 + \Delta t_6) \\ + \Delta f_5 \Delta t_6 \} \cdot 4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\sigma_8 = \frac{E}{L^2}$	$\frac{4}{3} \cdot \frac{(T - \sum_{i=1}^8 \Delta t_i)^3}{(T - \sum_{i=1}^7 \Delta t_i)} \cdot \frac{\Delta f_8}{\Delta t_8}$	$4(T - \sum_{i=1}^8 \Delta t_i) \cdot \sum_{i=1}^7 \Delta f_i$	$\text{above value} + \frac{4}{3} \cdot \frac{(T - \sum_{k=1}^7 \Delta t_k)^2}{(T - \sum_{k=1}^6 \Delta t_k)} \cdot \Delta f_7$	$\left\{ \begin{aligned} &\Delta f_1(\Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6 + \Delta t_7) \\ &+ \Delta f_2(\Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6 + \Delta t_7) \\ &+ \Delta f_3(\Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6 + \Delta t_7) \\ &+ \Delta f_4(\Delta t_5 + \Delta t_6 + \Delta t_7) \\ &+ \Delta f_5(\Delta t_6 + \Delta t_7) \\ &+ \Delta f_6(\Delta t_7) \end{aligned} \right\} \cdot 4$
$\sigma_9 = \frac{E}{L^2}$	$\frac{4}{3} \cdot \frac{(T - \sum_{i=1}^9 \Delta t_i)^3}{(T - \sum_{i=1}^8 \Delta t_i)} \cdot \frac{\Delta f_9}{\Delta t_9}$	$4(T - \sum_{i=1}^9 \Delta t_i) \cdot \sum_{i=1}^8 \Delta f_i$	$\text{above value} + \frac{4}{3} \cdot \frac{(T - \sum_{k=1}^8 \Delta t_k)^2}{(T - \sum_{k=1}^7 \Delta t_k)} \cdot \Delta f_8$	$\left\{ \begin{aligned} &\Delta f_1(\Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6 + \Delta t_7 + \Delta t_8) \\ &+ \Delta f_2(\Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6 + \Delta t_7 + \Delta t_8) \\ &+ \Delta f_3(\Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6 + \Delta t_7 + \Delta t_8) \\ &+ \Delta f_4(\Delta t_5 + \Delta t_6 + \Delta t_7 + \Delta t_8) \\ &+ \Delta f_5(\Delta t_6 + \Delta t_7 + \Delta t_8) \\ &+ \Delta f_6(\Delta t_7 + \Delta t_8) \\ &+ \Delta f_7(\Delta t_8) \end{aligned} \right\} \cdot 4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\sigma_{10} = \frac{E}{L^2}$	$\frac{4}{3} \cdot \frac{(T - \sum_{i=1}^{10} \Delta t_i)^3}{(T - \sum_{i=1}^9 \Delta t_i)} \cdot \frac{\Delta f_{10}}{\Delta t_{10}}$	$4(T - \sum_{i=1}^{10} \Delta t_i) \cdot \sum_{i=1}^9 \Delta f_i$	<p>above value +</p> $\frac{4}{3} \cdot \frac{(T - \sum_{k=1}^9 \Delta t_k)^2}{(T - \sum_{k=1}^8 \Delta t_k)} \cdot \Delta f_9$	$\left\{ \begin{aligned} &\Delta f_1 (\Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6 + \Delta t_7 + \Delta t_8 + \Delta t_9) \\ &+ \Delta f_2 (\Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6 + \Delta t_7 + \Delta t_8 + \Delta t_9) \\ &+ \Delta f_3 (\Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6 + \Delta t_7 + \Delta t_8 + \Delta t_9) \\ &+ \Delta f_4 (\Delta t_5 + \Delta t_6 + \Delta t_7 + \Delta t_8 + \Delta t_9) \\ &+ \Delta f_5 (\Delta t_6 + \Delta t_7 + \Delta t_8 + \Delta t_9) \\ &+ \Delta f_6 (\Delta t_7 + \Delta t_8 + \Delta t_9) \\ &+ \Delta f_7 (\Delta t_8 + \Delta t_9) \\ &+ \Delta f_8 (\Delta t_9) \end{aligned} \right\} \cdot 4$
-------------------------------	--	---	---	---



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SPECIMEN NO.	1	I_p	17	ON - OFF	4-14
--------------	---	-------	----	----------	------

LENGTH a (mm.)	WIDTH b (mm.)	THICKNESS T (mm.)	WEIGHT W_0 (mg.)	DEFLECTION Δf_0 (μ m.)
89.50	10.63	2.74	19611	+60

TEST	TIME	W_1 (mg.)	Δt_1 (mm.)	$m\Delta f_1$ (μ m.)	Δf_1 (mm.)	ϕ_1 (Kg_e/mm^2)
1	20 sec.	19596	0.0020	+58.5	0.0015	20.618
2	15 sec.	19590	0.0008	+57.5	0.0010	35.121
3	110 sec.	19572	0.0024	+53.0	0.0045	53.251
4	2 min.	19554	0.0024	+50.0	0.0030	35.121
5	3 min.	19518	0.0049	+46.0	0.0040	22.541
6	4 min.	19374	0.0194	+42.0	0.0040	4.843
7	5 min.	19180	0.0261	+40.0	0.0020	1.085
8	6 min.	19003	0.0239	+35.0	0.0050	4.931
9	7 min.	18816	0.0252	+35.0	0.0000	-1.138
10	10 min.	18528	0.0388	+35.0	0.0000	-1.206

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SPECIMEN NO.	2	I_p	17	ON - OFF	4-14
--------------	---	-------	----	----------	------

LENGTH a (mm)	WIDTH b (mm)	THICKNESS T (mm)	WEIGHT W_0 (mg)	DEFLECTION Δf_0 (μ m)
89.00	10.65	2.75	19610	+55

TEST	TIME	W_1 (mg.)	Δt_1 (mm.)	Δf_1 (μ m.)	Δf_1 (mm)	δ_1 (Kg _e /mm ²)
1	30 sec.	19590	0.0027	+52	0.0030	32.497
2	45 sec.	19567	0.0031	+47	0.0050	47.856
3	1 min.	19530	0.0050	+41	0.0060	35.218
4	2 min.	19483	0.0064	+35	0.0060	27.183
5	3 min.	19445	0.0051	+31	0.0040	22.495
6	5 min.	19348	0.0131	+27	0.0040	7.834
7	6 min.	19227	0.0164	+22	0.0045	6.887
8	7 min.	19094	0.0180	+22	0.0000	-1.512
9	9 min.	18920	0.0235	+22	0.0000	-1.643
10						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SPECIMEN NO.	3	I_p	16	ON - OFF	4-14
--------------	---	-------	----	----------	------

LENGTH a (mm.)	WIDTH b (mm.)	THICKNESS T (mm.)	WEIGHT W_0 (mg.)	DEFLECTION Δf_0 (μ m.)
88.30	10.60	2.80	19601	-10

TEST	TIME	W_1 (mg.)	Δt_1 (mm.)	$m\Delta f_1$ (μ m.)	Δf_1 (mm.)	ϕ_1 (Kg_e/mm^2)
1	10 sec.	19588	0.0018	-11.5	0.0015	24.519
2	20 sec.	19573	0.0021	-14.5	0.0030	42.513
3	30 sec.	19559	0.0019	-16.0	0.0015	23.194
4	1 min.	19536	0.0031	-17.5	0.0015	13.955
5	2 min.	19274	0.0395	-19.5	0.0020	0.859
6	3 min.	19113	0.0221	-22.5	0.0030	3.432
7	4 min.	18892	0.0303	-24.5	0.0020	1.323
8	5 min.	18691	0.0275	-24.5	0.0000	-0.672
9	7 min.	18481	0.0288	-24.5	0.0000	-0.882
10						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SPECIMEN NO.	4	I_p	16	ON - OFF	4-14
--------------	---	-------	----	----------	------

LENGTH a (mm)	WIDTH b (mm)	THICKNESS T (mm)	WEIGHT W_o (mg)	DEFLECTION Δf_o (μ m)
88.50	10.65	2.78	19712	-11

TEST	TIME	W_1 (mg.)	Δt_1 (mm.)	$m\Delta f_1$ (μ m.)	Δf_1 (mm)	δ_1 (Kg _f /mm ²)
1	10 sec.	19700	0.0016	-12.0	0.0010	17.641
2	20 sec.	11968	0.0026	-15.5	0.0035	39.167
3	30 sec.	19652	0.0039	-20.0	0.0045	33.427
4	1 min.	19609	0.0058	-24.0	0.0040	19.571
5	2 min.	19406	0.0276	-27.5	0.0035	2.771
6	3 min.	19207	0.0271	-30.5	0.0030	2.290
7	4 min.	19001	0.0280	-33.0	0.0025	1.651
8	5 min.	18793	0.0283	-33.0	0.0000	-1.015
9	7 min.	18581	0.0288	-33.0	0.0000	-1.147
10						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SPECIMEN NO.	5	I_p	15	ON - OFF	4-14
--------------	---	-------	----	----------	------

LENGTH a (mm.)	WIDTH b (mm.)	THICKNESS T (mm.)	WEIGHT W_o (mg.)	DEFLECTION Δf_o (μ m.)
88.50	10.62	3.01	21154	-7

TEST	TIME	W_i (mg.)	Δt_i (mm.)	$m\Delta f_i$ (μ m.)	Δf_i (mm.)	δ_i (Kg _f /mm ²)
1	10 sec.	21147	0.0016	-8.0	0.0010	20.732
2	20 sec.	21132	0.0020	-10.0	0.0020	33.570
3	30 sec.	21115	0.0023	-11.5	0.0015	21.663
4	1 min.	21090	0.0034	-12.5	0.0010	9.405
5	2 min.	20890	0.0273	-14.5	0.0020	1.844
6	3 min.	20660	0.0314	-16.5	0.0020	1.516
7	4 min.	20406	0.0346	-18.5	0.0020	1.315
8	5 min.	20168	0.0325	-20.5	0.0020	1.443
9	7 min.	19939	0.0312	-20.5	0.0000	-0.664
10	9 min.	19712	0.0310	-20.5	0.0000	-0.810

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SPECIMEN NO.	6	I_p	15	ON - OFF	4-14
--------------	---	-------	----	----------	------

LENGTH a (mm)	WIDTH b (mm)	THICKNESS T (mm)	WEIGHT W_o (mg)	DEFLECTION Δf_o (μ m)
88.75	10.64	2.95	20957	-7

TEST	TIME	W_1 (mg.)	Δt_1 (mm.)	$m\Delta f_1$ (μ m.)	Δf_1 (mm)	ϕ_1 (Kg_e/mm^2)
1	10 sec.	20949	0.0011	-8.0	0.0010	29.561
2	20 sec.	20932	0.0023	-10.5	0.0025	35.483
3	30 sec.	20912	0.0027	-11.5	0.0015	17.790
4	1 min.	20881	0.0042	-13.5	0.0020	15.148
5	2 min.	20672	0.0284	-15.5	0.0020	1.638
6	3 min.	20447	0.0305	-18.0	0.0025	2.023
7	4 min.	20210	0.0322	-21.0	0.0030	2.396
8	5 min.	19956	0.0345	-21.0	0.0000	-0.706
9	7 min.	19683	0.0371	-21.0	0.0000	-0.951
10						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SPECIMEN NO.	7	I_p	14	ON - OFF	4-14
--------------	---	-------	----	----------	------

LENGTH a (mm.)	WIDTH b (mm.)	THICKNESS T (mm.)	WEIGHT W_0 (mg.)	DEFLECTION Δf_0 (μ m.)
89.30	10.62	2.80	21463	-0.5

TEST	TIME	W_1 (mg.)	Δt_1 (mm.)	$m\Delta f_1$ (μ m.)	Δf_1 (mm.)	σ_1 (Kg_f/mm^2)
1	10 sec.	21452	0.0015	-1.0	0.0005	10.160
2	20 sec.	21437	0.0020	-2.5	0.0015	23.304
3	30 sec.	21417	0.0027	-3.5	0.0010	11.328
4	1 min.	21392	0.0034	-4.5	0.0010	8.923
5	2 min.	21242	0.0203	-6.0	0.0015	1.976
6	3 min.	21088	0.0208	-8.0	0.0020	2.678
7	4 min.	20917	0.0231	-8.0	0.0000	-0.355
8	5 min.	20714	0.0274	-8.0	0.0000	-0.502
9						
10						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

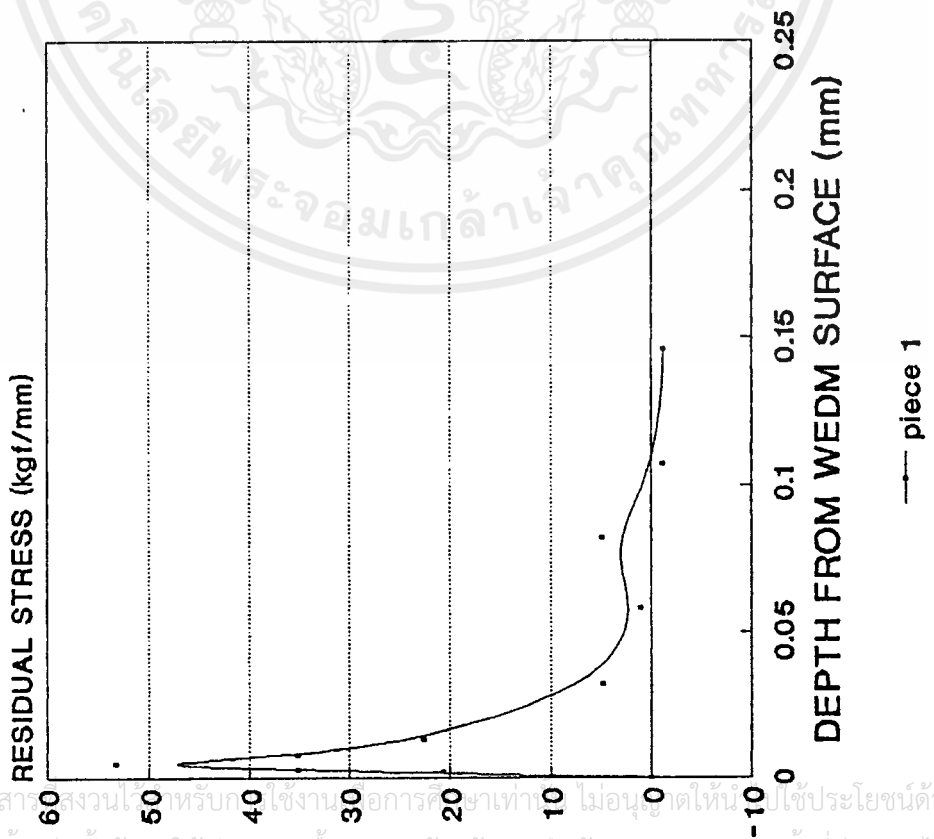
SPECIMEN NO. 8	I_p 14	ON - OFF 4-14
----------------	----------	---------------

LENGTH a (mm)	WIDTH b (mm)	THICKNESS T (mm)	WEIGHT W_o (mg)	DEFLECTION Δf_o (μ m)
90.00	10.60	2.90	20814	-0.5

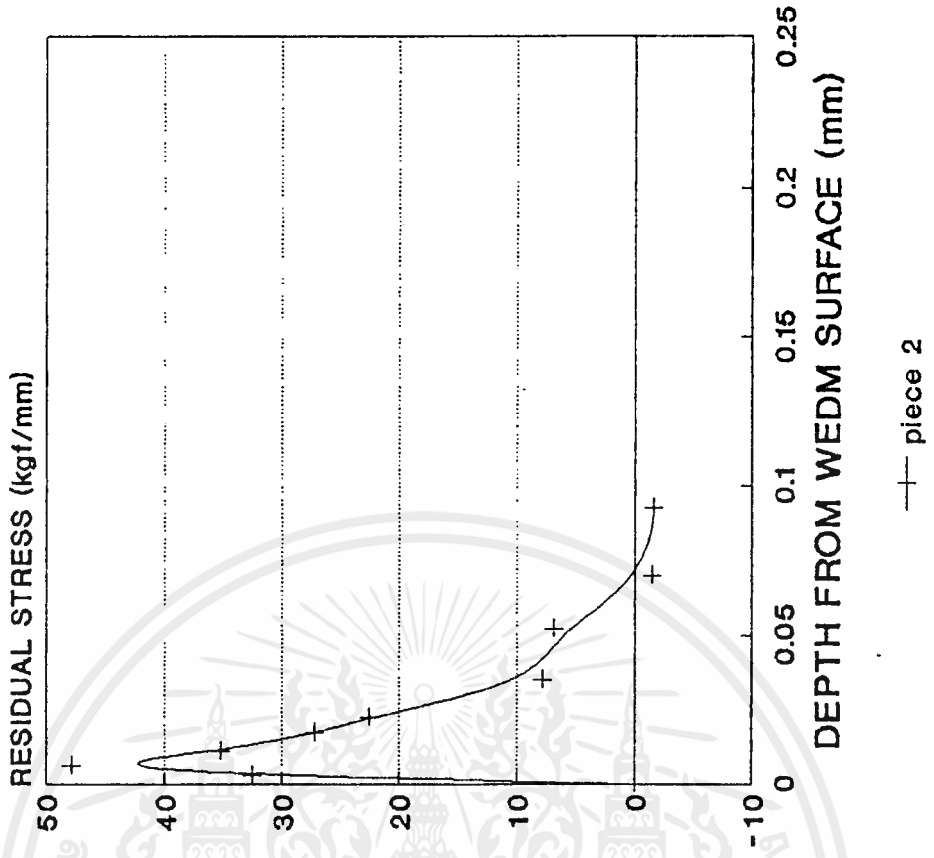
TEST	TIME	W_1 (mg.)	Δt_1 (mm.)	$m\Delta f_1$ (μ m.)	Δf_1 (mm)	σ_1 (Kg _f /mm ²)
1	10 sec.	20805	0.0012	-1.0	0.0005	13.395
2	20 sec.	20790	0.0020	-1.5	0.0015	24.539
3	30 sec.	20771	0.0026	-2.5	0.0010	12.324
4	1 min.	20737	0.0046	-4.0	0.0015	10.367
5	2 min.	20591	0.0196	-6.5	0.0025	3.730
6	3 min.	20432	0.0214	-8.0	0.0015	1.809
7	4 min.	20268	0.0220	-10.5	0.0025	3.264
8	5 min.	20091	0.0238	-10.5	0.0000	-0.535
9	7 min.	19900	0.0257	-10.5	0.0000	-0.665
10						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

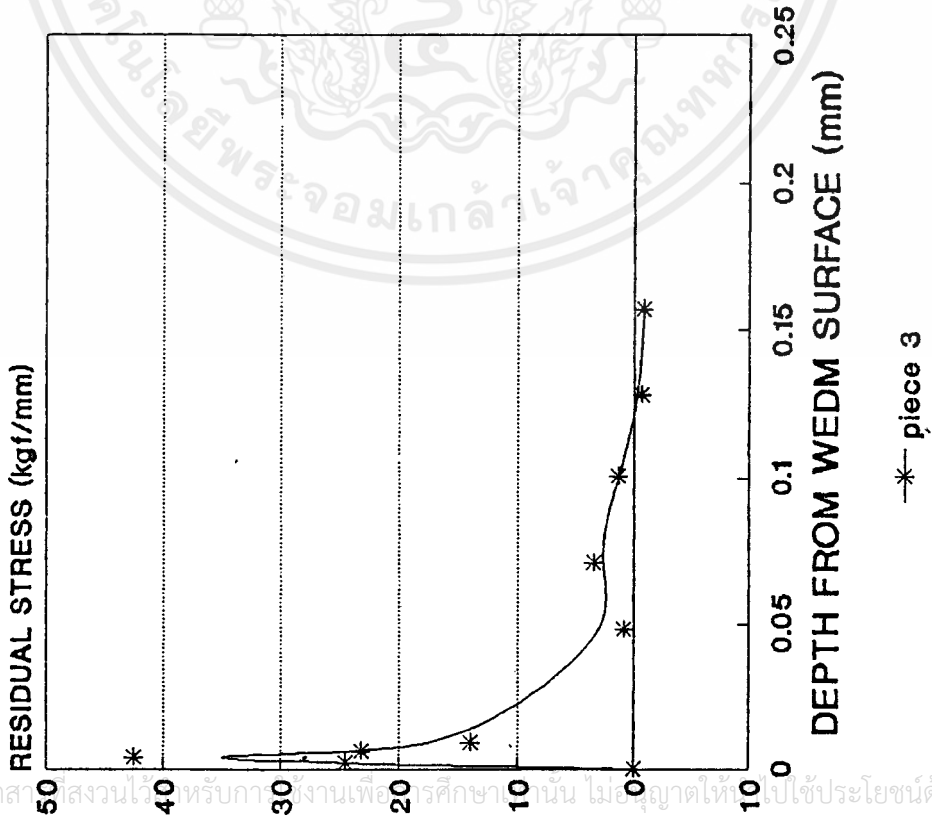
PIECES No.1



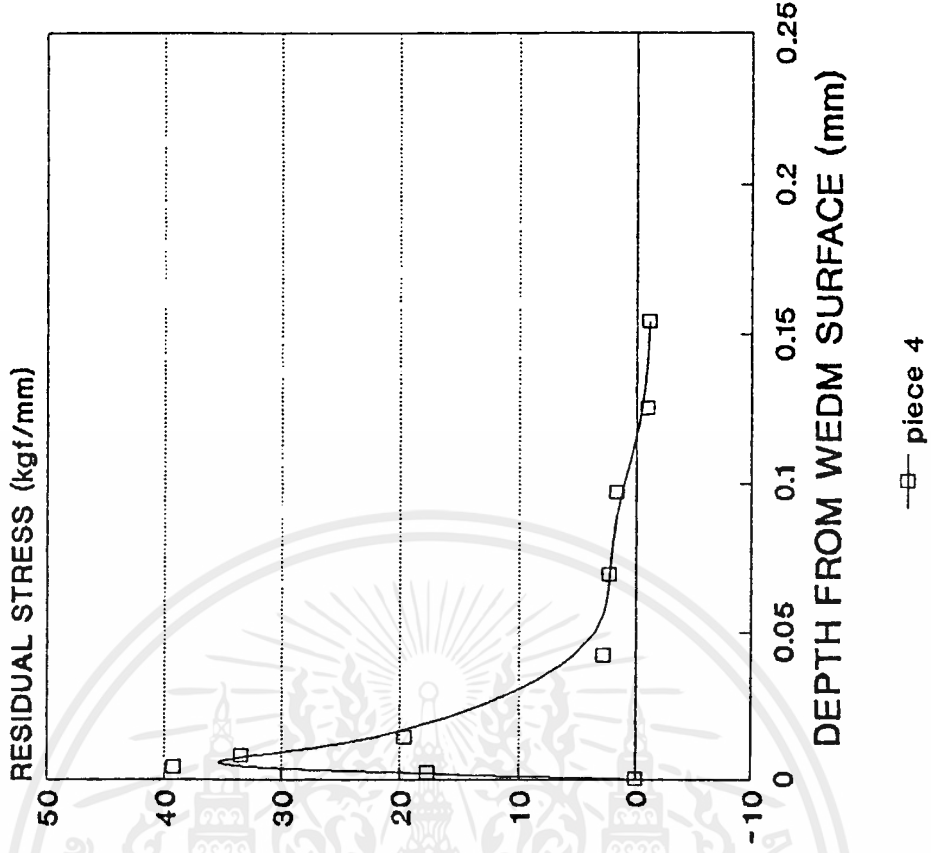
PIECES No.2



PIECES No.3

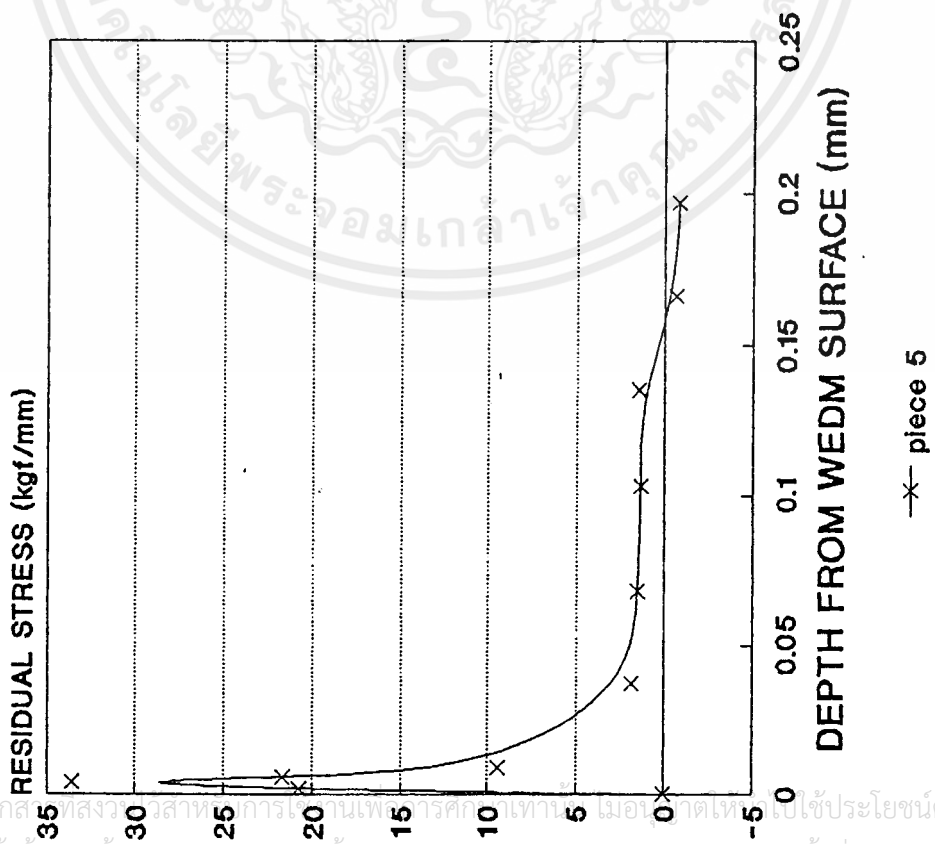


PIECES No.4

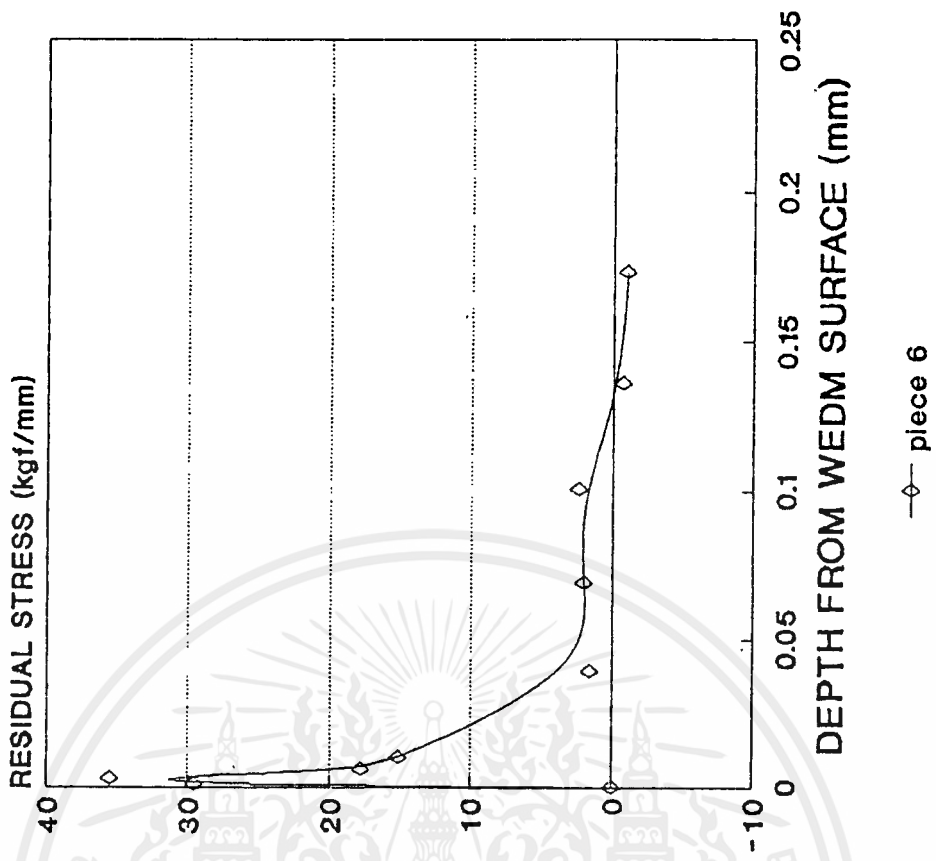


เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

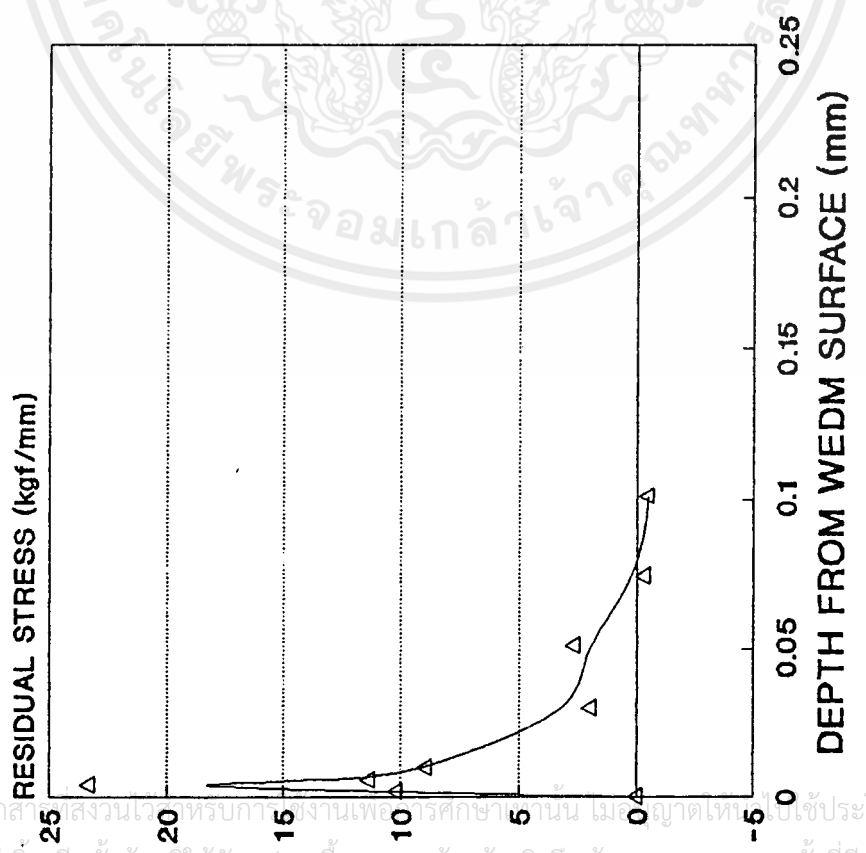
PIECES No.5



PIECES No.6

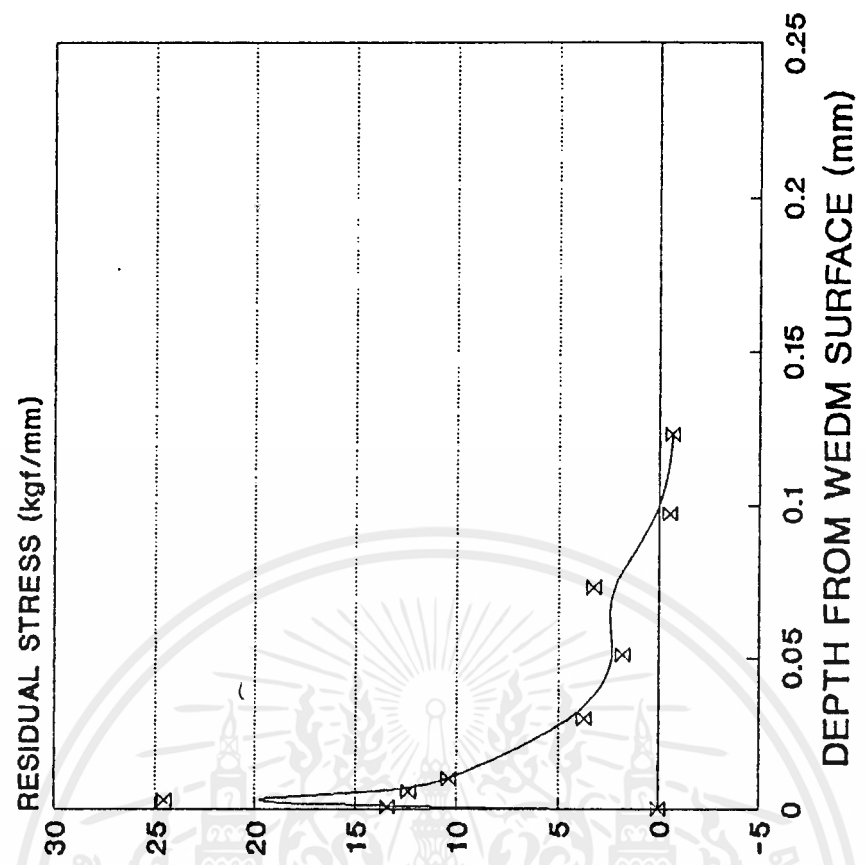


PIECES No.7



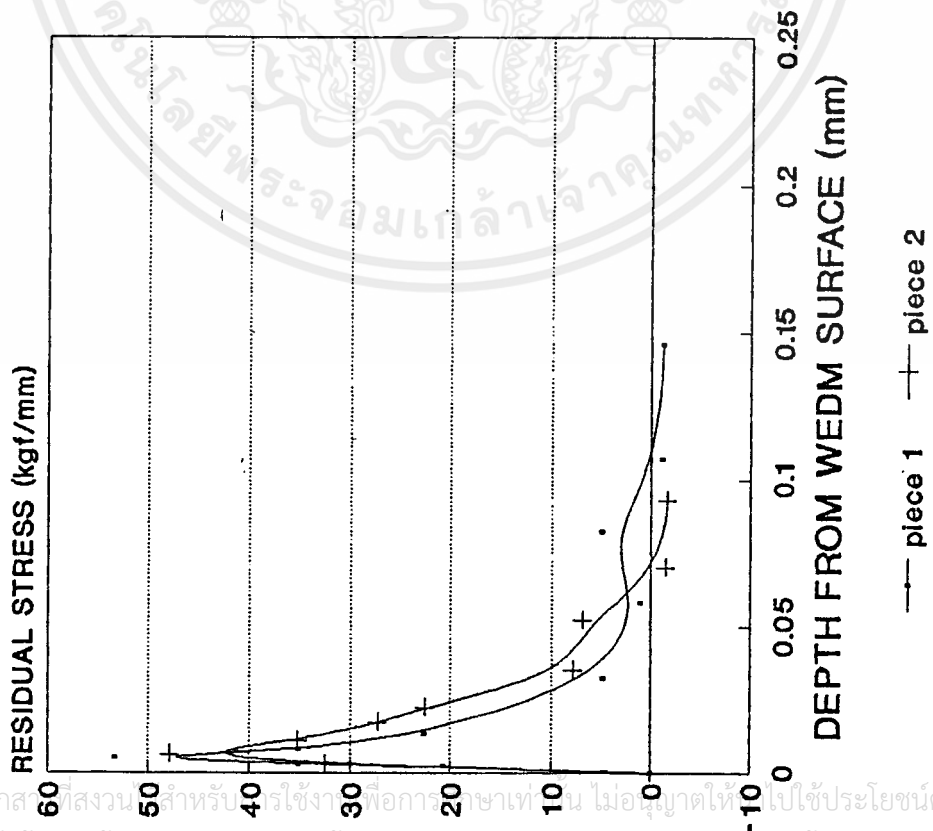
—△— piece 7

PIECES No.8

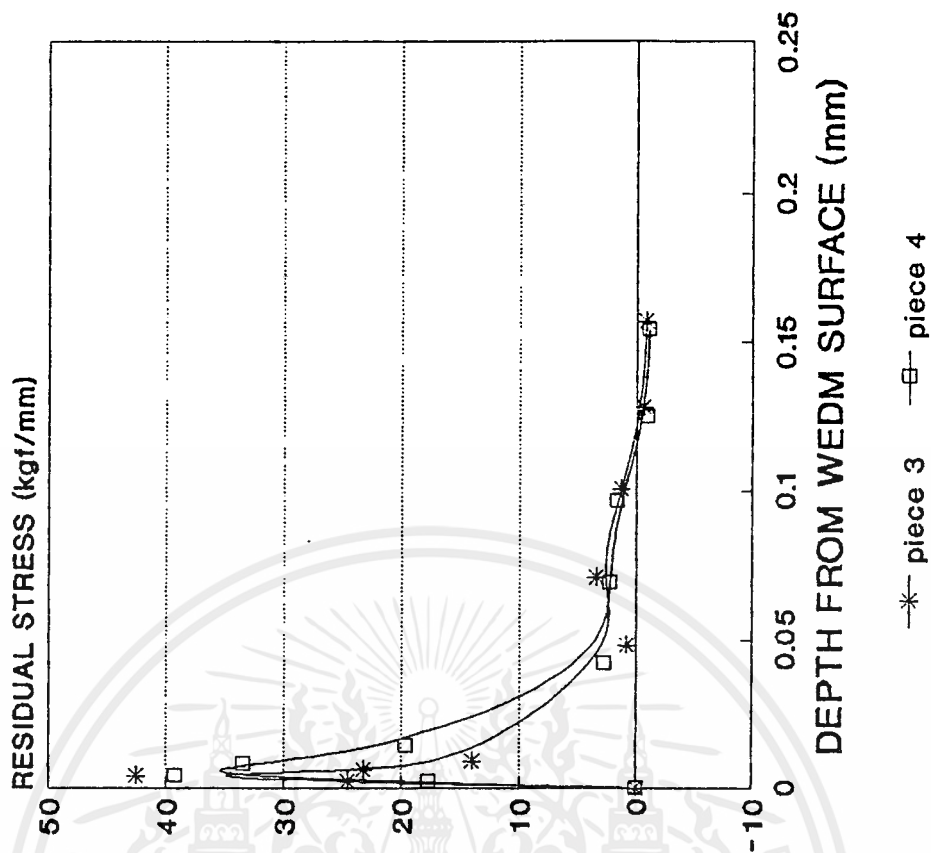


—x— piece 8

PIECES No.1 & No.2

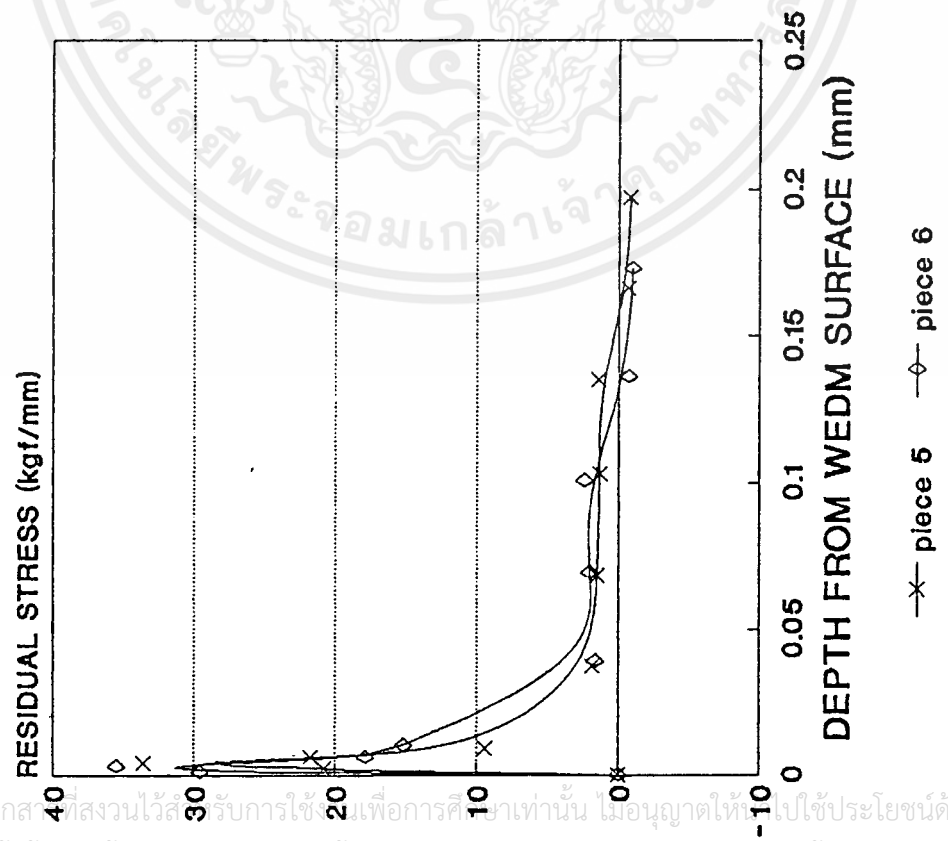


PIECES No.3 & No.4

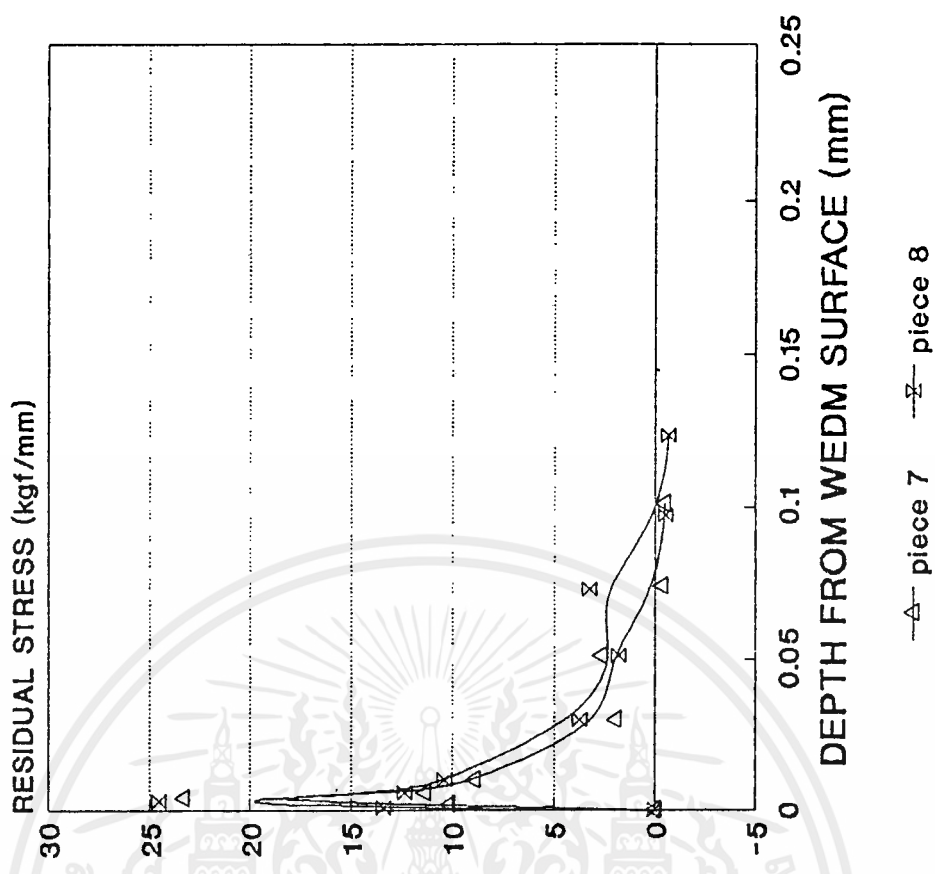


เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้ภายในงานวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PIECES No.5 & No.6

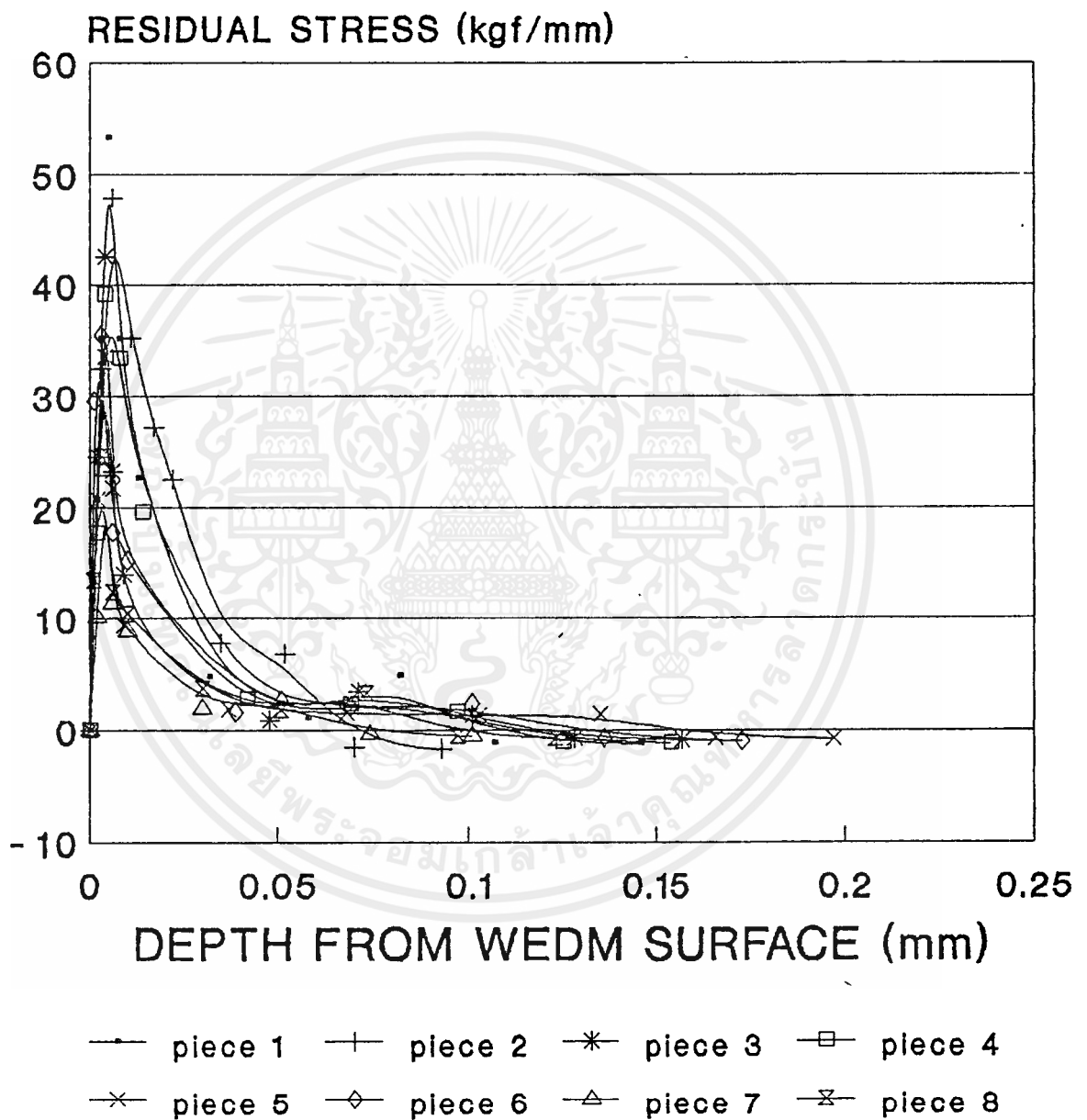


PIECES No.7 & No.8



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้รับบริการใช้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RESIDUAL STRESS FROM WIRE CUT EDM.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ พบว่าค่าความเค้นตกค้าง (Residual Stress) ในเนื้อเหล็กที่ผ่านการตัดด้วยเครื่อง Wire Cut EDM จะแปรผันตรงกับปริมาณของกระแสที่ผ่านเส้นลวด (I_p) ซึ่งเห็นได้ชัดว่าเมื่อลดปริมาณของกระแสที่ผ่านเส้นลวด ค่าความเค้นตกค้างสูงสุด (Maximum Residual Stress) จะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่ลึกจากผิว EDM Surface มากกว่าการใช้ปริมาณกระแสที่ต่ำกว่า



กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ

ผศ. ทวี	เทศ เจริญ
ผศ. พรศักดิ์	อรรณวนิช
คุณ มณฑา	เทียมเมือง

ที่ได้ให้คำปรึกษาและช่วยแก้ปัญหา โดยตลอดจนทำให้ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จได้



คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. Wire-Cut EDM A280L Fine Sodick , machine condition table , Vol 1.
2. Fine Sodick Wire-Cut EDM A280L ,instruction manual and machine tool, Vol.1.0G
3. Wire-Cut Electrical-Discharge Machine NC Power Supply , control system , Fine Sodick , Vol. 2.0U.
4. Wire-Cut Electrical-Discharge Machine NC Power Supply Unit MARK-EX , Code Instruction, Fine Sodick , Vol. 1.0
5. Fine Sodick Wire Cut-EDM , Fine APT , Vol. 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้